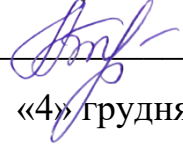


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Факультет економіки та екології моря
Кафедра екології та природоохоронних технологій

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



«4» грудня 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
на тему: «ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДИ МІКРОПЛАСТИКОМ
ТА ЙОГО ПОТЕНЦІЙНОГО ВПЛИВУ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ»

Виконав: студентка 6 курсу, 6271м групи



Гераськова Д.В.

Керівник роботи:

Керівник д.т.н., професор

(посада, науковий ступень вчене звання)

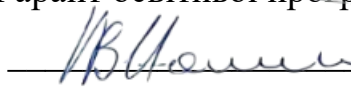


Трохименко Г.Г.

Миколаїв – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Факультет економіки та екології моря

Кафедра екології та природоохоронних технологій
Спеціальність 101 Екологія
Освітня програма Екологія

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту Гераськовій Діані Володимирівній

1. Тема роботи: «Оцінка рівня забруднення води мікропластиком та його потенційного впливу на здоров'я людини».

Керівник роботи Трохименко Г. Г.

Затверджені наказом ректора № ____ від «___» листопада 2024 р.

2. Термін подання роботи: 23 грудня 2024 р.

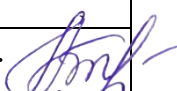
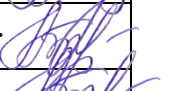
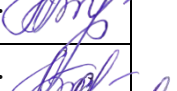
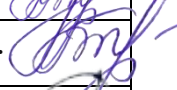
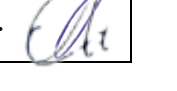
3. Вихідні данні по роботі: огляд літературних джерел.

4. Перелік питань, що належать до розробки: європейське законодавство щодо пластику, мікропластику та його імплементація, українське законодавство щодо пластику, мікропластику та його імплементація, способи виявлення мікропластику в компонентах довкілля, технології очищення гідроекосистем та

інших компонентів довкілля від мікропластику, порівняльний аналіз методів видалення мікропластику з води, його вплив, економічний аналіз забруднення мікропластиком навколишнього середовища, охорона праці у офісі.

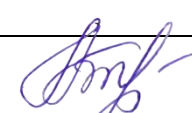
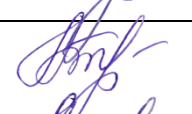
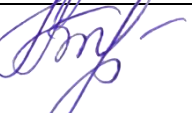
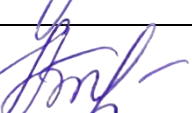
5. Перелік презентаційних матеріалів: електронна презентація з 19 слайдів.

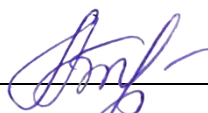
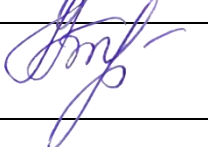
6. Виконання розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	<u>Трохименко Г. Г., професор</u>	06.09.2024 р.	23.10.2024 р. 
II	<u>Трохименко Г. Г., професор</u>	09.09.2024 р.	02.11.2024 р. 
III	<u>Трохименко Г. Г., професор</u>	11.09.2024 р.	12.11.2024 р. 
IV	<u>Трохименко Г. Г., професор</u>	15.09.2024 р.	12.11.2024 р. 
V	<u>Трохименко Г. Г., професор</u>	15.09.2024 р.	16.11.2024 р. 
VI	<u>Літвак О.А., доцент</u>	15.09.2024 р.	18.11.2024 р. 

7. Дата видачі завдання 15.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Підпис керівника
1.	Підготовчий етап: вибір теми, розроблення обґрунтування теми	червень 2024 р.	
2.	Проведення аналізу досліджень різних авторів	червень 2024 р.	
3.	Аналітичний етап – обробка та інтерпретація результатів власного дослідження	вересень 2024 р.	
4.	Опрацювання об'єктної частини дослідження (теоретичний етап)	вересень 2024 р.	
5.	Підготовка тексту магістерської роботи	вересень - листопад 2024 р.	
6.	Перевірка на наявність текстових збігів/ідентичності/схожості Із використанням програмно-технічного Засобу Антиплагіатної	17 листопада 2024 р.	

	інтернет-системи Unichек		
7.	Рецензування магістерської роботи	27 листопада 2024 р.	
8.	Попередній розгляд магістерської роботи на кафедрі	4 грудня 2024 р.	
9.	Офіційний захист магістерської роботи на засіданні АК	23 грудня 2024 р.	

Студент



(підпис)

Д.Г. Гераськова

(ПІБ)

Керівник роботи



(підпис)

Г. Г. Трохименко

(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Пластмаси та мікропластик - це забруднювачі, який широко присутній майже у всіх сферах навколишнього середовища. Однак знання про їхні джерела, динаміку та просторово-часові концентрації в навколишньому середовищі все ще обмежені через трудомісткі та різноманітні аналітичні методи, що використовуються в даний час.

У 2014 році було підраховано, що в світовому океані знаходиться від 15 до 51 трильйона окремих частинок мікропластику, вага яких, за оцінками, становить від 93 000 до 236 000 метричних тонн. [1-3]

Термін макропластик використовується для того, щоб відрізнити мікропластик від більшого пластикового сміття, такого як пластикові пляшки або більші шматки пластику. В даний час відомі дві класифікації мікропластику.

Робота має п'ять розділів, кожен з яких має підпункти. В першому розділі мова ведеться про Європейське законодавство щодо пластику, мікропластику та його імплементація. В другому розділі розглядається Українське законодавство щодо пластику, мікропластику та його імплементація. Третій розділ подає способи виявлення мікропластику в компонентах довкілля та технології очищення гідроекосистем та інших компонентів довкілля від мікропластику. Четвертий та п'ятий розділ про економічний аналіз забруднення мікропластиком навколишнього середовища та охорону праці при роботі в офісі.

Отже, **метою роботи** є оцінка рівня забруднення води мікропластиком та його потенційного впливу на здоров'я людини

Завдання роботи:

- Дослідити появу мікропластику, види мікропластику, його поширеність та вплив, застосування та сферу використання.

- Проаналізувати перші заходи щодо зниження кількості мікропластику та пластику в довкіллі та сучасне європейське законодавство щодо мікропластику.
- Розглянути основні положення Європейського законодавства щодо поводження з пластиком.
- Розглянути основні положення Українського законодавства щодо пластику в довкіллі та мікропластика.
- Охарактеризувати способи виявлення мікропластику в компонентах довкілля та технології очищення гідроекосистем та інших компонентів довкілля від мікропластику.

Ключові слова: забруднення мікропластиком, водне середовище, вплив на довкілля, виявлення мікропластику, законодавство України щодо поводження з пластиком, законодавство Європи поводження з пластиком, переробка мікропластику.

ABSTRACT

Plastics and microplastics are pollutants that are widely present in almost all areas of the environment. However, knowledge of their sources, dynamics, and spatiotemporal concentrations in the environment is still limited due to the time-consuming and diverse analytical methods currently used.

In 2014, it was estimated that there are between 15 and 51 trillion individual microplastic particles in the world's oceans, with an estimated weight of between 93,000 and 236,000 metric tons. [1-3 Б]

The term macroplastic is used to distinguish microplastics from larger plastic debris such as plastic bottles or larger pieces of plastic. Currently, there are two known classifications of microplastics.

The paper has five chapters, each of which has sub-sections. The first chapter discusses European legislation on plastics, microplastics and its implementation. The second chapter consider Ukrainian legislation on plastics, microplastics and its implementation. The third chapter presents methods for detecting microplastics in environmental components and technologies for cleaning hydroecosystems and other environmental components from microplastics. The fourth and fifth chapter are about the economic analysis of environmental pollution by microplastics and labor protection when working in the laboratory. Thus, the **aim** of the paper is to analyze the European and Ukrainian legislation on the regulation of microplastics in the environment.

Objectives:

- To investigate the emergence of microplastics, types of microplastics, their prevalence and impact, applications and uses.
- To analyse the first measures to reduce the amount of microplastics and plastics in the environment and current European legislation on microplastics.
- To consider the main provisions of the European legislation on plastic management.
- To consider the main provisions of Ukrainian legislation on plastic in the environment and microplastics.

- To describe the methods of detecting microplastics in environmental components and technologies for cleaning hydroecosystems and other environmental components from microplastics.

Keywords: *microplastic pollution, aquatic environment, environmental impact, detection of microplastics, Ukrainian legislation on plastic management, European legislation on plastic management, microplastic recycling.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ I. ЄВРОПЕЙСЬКЕ ЗАКОНОДАВСТВО У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ, А САМЕ ПЛАСТИКУ ТА МІКРОПЛАСТИКУ. ЙОГО ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ	17
1.1. Поява мікропластику, види мікропластику, його поширеність та вплив, застосування та сфера використання	17
1.2. Перші заходи щодо зниження кількості мікропластику та пластику в довкіллі та сучасне європейське законодавство щодо пластику та мікропластику	23
Висновки до розділу	28
РОЗДІЛ II. ПРОГАЛИНИ В УКРАЇНСЬКОМУ ЗАКОНОДАВСТВІ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ, А САМЕ ПЛАСТИКУ ТА МІКРОПЛАСТИКУ. ЙОГО ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ.....	30
2.1. Основні положення українського законодавства у сфері управління відходами, а саме пластику та мікропластику. Законодавчі норми щодо обмеження використання одноразового пластику	30
2.2. Імплементация українського законодавства щодо пластику та мікропластика. Боротьба з мікропластиком: законодавчі заходи та їх реалізація.....	34
2.3. Необхідність прийняття Закону України «Про управління відходами»...	39
2.4. Особливості щодо процесу імплементации Закону України «Про управління відходами»	48
Висновки до розділу	57
РОЗДІЛ III. СПОСОБИ ВИЯВЛЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В КОМПОНЕНТАХ ДОВКІЛЛЯ. ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГІДРОЕКОСИСТЕМ ТА ІНШИХ КОМПОНЕНТІВ ДОВКІЛЛЯ ВІД МІКРОПЛАСТИКУ	59
3.1. μ -FT-IR (Фур'є-спектроскопія) мікроскопія та Раман-спектроскопія	55

3.2.	Виявлення та кількісне визначення забруднення людської крові та фекалій пластиковими частинками	67
3.3.	Просторовий розподіл мікропластику в донних відкладеннях транскордонної річки – приклад річки Тиса в Центральній Європі	73
	Висновки до розділу	79
РОЗДІЛ IV. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДАЛЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ З ВОДИ.....		81
4.1.	Проблематика виявлення та видалення мікропластику зі складних екологічних матриць	81
4.2.	Методи вилучення мікропластику	90
4.3.	Вплив мікропластику на екосистеми, людей та тварин	104
4.4.	Заходи зі зменшення мікропластику у довкіллі. Переробка пластику....	118
	Висновки до розділу	126
РОЗДІЛ V. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ МІКРОПЛАСТИКОМ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА		128
5.1.	Економічні і соціальні аспекти забруднення довкілля пластиковими відходами	128
5.2.	Перехід до циркулярності використання пластику	132
	Висновки до розділу	136
РОЗДІЛ VI. ОХОРОНА ПРАЦІ У ОФІСІ		139
6.1.	Охорона праці робітників в офісних кабінетах та розрахунок освітленості приміщення	139
ВИСНОВКИ		146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		148

ВСТУП

Пластмаси принесли велику користь людству і зробили можливими деякі з найбільш значних досягнень сучасної цивілізації в таких різноманітних галузях, як медицина, електроніка, аерокосмічна промисловість, будівництво, упаковка харчових продуктів і спорт. Однак тепер зрозуміло, що пластик також завдає значної шкоди здоров'ю людей, економіці та навколишньому середовищу Землі. Ця шкода виникає на кожному етапі життєвого циклу пластику, від видобутку вугілля, нафти та газу, які є його основною сировиною, до остаточної утилізації в навколишнє середовище. Масштаби цих збитків систематично не оцінювалися, їх величина не була повністю кількісно оцінена, а їхні економічні витрати не були всебічно підраховані, тому проблема забруднення мікропластиком довкілля є дуже **актуальною**.

Пластмаси — це широкий спектр синтетичних або напівсинтетичних матеріалів, в яких в якості основного інгредієнта використовуються полімери. Їх пластичність дозволяє формувати, екструзувати або пресувати пластмаси в тверді предмети різної форми. Ця адаптивність, а також широкий спектр інших властивостей, таких як легкість, міцність, гнучкість і недорогі у виробництві, призвели до їх широкого використання. Пластмаси зазвичай виготовляються за допомогою людських промислових систем. Більшість сучасних пластмас отримують із хімічних речовин на основі викопного палива, таких як природний газ або нафта; Однак останні промислові методи використовують варіанти, виготовлені з відновлюваних матеріалів, таких як кукурудза або похідні бавовни [4].

Пластмаси складаються з полімерної основи на основі вуглецю та тисяч додаткових хімічних речовин, які включені в полімери для передачі певних властивостей, таких як колір, гнучкість, стабільність, водовідштовхувальні властивості, вогнестійкість та стійкість до ультрафіолету. Багато з цих доданих хімічних речовин дуже токсичні. Вони включають канцерогени,

нейротоксиканти та ендокринні руйнівники, такі як фталати, бісфеноли, пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS), бромовані антипірени та фосфорорганічні антипірени. Вони є невід'ємними компонентами пластику і відповідальні за багато шкоди пластику для здоров'я людини та навколишнього середовища.

Світове виробництво пластику зросло майже в геометричній прогресії з часів Другої світової війни, і за цей час було виготовлено понад 8 300 мегатонн пластику. Річний обсяг виробництва зріс з менш ніж 2 млн тонн у 1950 році до 460 млн тонн у 2019 році, тобто у 230 разів, і планується потроїти до 2060 року. Більше половини всього пластику, коли-небудь створеного, було вироблено з 2002 року. Одноразовий пластик становить 35–40% сучасного виробництва пластмас і є найбільш швидкозростаючим сегментом виробництва пластмас.

Бурхливе зростання виробництва пластмас останнім часом відображає навмисний поворот інтегрованих транснаціональних корпорацій з вичерпним вуглецем, які видобувають вугілля, нафту і газ, а також виробляють пластмаси. Ці корпорації скорочують виробництво вичерпного палива та збільшують виробництво пластмас. Двома основними факторами, відповідальними за цей поворот, є зниження світового попиту на вуглецеве паливо через збільшення «зеленої» енергетики та масове розширення видобутку нафти та газу за рахунок фрекінгу.

Виробництво пластику є енергоємним і робить значний внесок у зміну клімату. В даний час виробництво пластику відповідальне за приблизно 3,7% світових викидів парникових газів, що більше, ніж внесок Бразилії. Прогнозується, що ця частка зросте до 4,5% до 2060 року, якщо поточні тенденції збережуться.

Пластик буває різних форм і розмірів і потрапляє на пляжі та в океани з багатьох джерел: великі предмети, такі як викинуте рибальське спорядження або предмети з транспортних контейнерів, втрачаються безпосередньо в морі, тоді як інші викинуті предмети можуть надходити з річковим стоком. Також неналежне управління пластиковими відходами на суші з країн із великою

береговою лінією спричиняє не менший рівень забруднення. Найбільший сектор світового ринку пластикових матеріалів – це пакувальні матеріали. Багато прибережних країн світу наразі не мають ні політики переробки, ні технічних можливостей, тому велика кількість пластику не переробляється та потрапляє на звалище.

Мікропластик — це фрагменти будь-якого типу пластику довжиною менше 5 мм (0,20 дюйма), [5] згідно з даними Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA) [6-7] та Європейського хімічного агентства [8]. Вони спричиняють забруднення, потрапляючи в природні екосистеми з різних джерел, включаючи косметику, одяг, упаковку харчових продуктів і промислові процеси. [5][9]. Мікропластик є широко поширеним забруднювачем, присутнім практично в усіх частинах навколишнього середовища. Проте знання про джерела, долю та концентрацію в навколишньому середовищі в часі та просторі все ще обмежені через трудомісткі та різноманітні аналітичні процедури, які зараз використовуються.

Оскільки пластик розкладається повільно (часто протягом сотень або тисяч років), мікропластик має високу ймовірність проковтування, інкорпорації (включення) та накопичення в тілах і тканинах багатьох організмів. Токсичні хімічні речовини, які надходять як з океану, так і зі стоком, також можуть підвищувати біопотужність харчового ланцюга. У наземних екосистемах було продемонстровано, що мікропластик знижує життєздатність ґрунтових екосистем і зменшує вагу дощових черв'яків. [10 -11]

Наразі не існує єдиного європейського закону, який би всеосяжно охоплював мікропластик. Також немає економічних стимулів для бізнесу вживати заходів щодо зменшення присутності мікропластику в навколишньому середовищі. Є кілька окремих законів із частковими цілями:

- Рамкова директива морської стратегії.
- Положення про внесення добрив.

- Пропозиція щодо обмеження REACH – стосується навмисно доданого мікропластику [12].

Як перший крок, Європейська комісія звернулася до Європейського хімічного агентства (ЕСНА) з проханням підготувати досвід щодо обмеження використання мікропластику, навмисно доданого до споживчих або професійних продуктів. Незабаром Комісія оцінить подання ЕСНА та обміркує найбільш прийнятні заходи. Для боротьби із забрудненням мікропластиком, одночасно запобігаючи ризику фрагментації єдиного ринку, Комісія звернулася до Європейського хімічного агентства (ЕСНА) з проханням оцінити ризик, який становить мікропластик, навмисно доданий до продуктів, і чи потрібні подальші регулятивні дії на рівні ЄС. ЕСНА дійшло висновку, що мікропластик, навмисно доданий до певних продуктів, викидається в навколишнє середовище неконтрольованим чином, і рекомендувало обмежити його використання.

Ґрунтуючись на наукових доказах, наданих ЕСНА, Комісія розробила пропозицію щодо обмеження відповідно до REACH, за яку позитивно проголосували країни ЄС і успішно пройшла перевірку Європейського парламенту та Ради перед ухваленням.

Паралельно в Європейській зеленій угоді та новому плані дій циркулярної економіки Європейська комісія оголосила про нову ініціативу щодо вирішення проблеми ненавмисного викиду мікропластику в навколишнє середовище. Це спрямовано на:

- розробити маркування, стандартизацію, сертифікацію та регуляторні заходи щодо ненавмисного вивільнення мікропластику, включаючи заходи для збільшення захоплення мікропластику на всіх відповідних етапах життєвого циклу продукції;
- подальша розробка та гармонізація методів вимірювання ненавмисного виділення мікропластику, особливо з шин і текстилю, а також надання узгоджених даних щодо концентрації мікропластику в морській воді;

- ліквідувати прогалини в наукових знаннях щодо ризику та наявності мікропластику в навколишньому середовищі, питній воді та їжі.

Важливо відстежувати прогрес у напрямку циркулярної економіки та її прямі та непрямі переваги. Це дозволяє ЄС і національним органам влади оцінювати ефективність політики та визначати найкращі практики.

У 2023 році Комісія переглянула систему моніторингу економіки замкнутого циклу, прийняту раніше в 2018 році. Перегляд додає нові показники щодо:

- матеріальний слід і продуктивність ресурсів — для моніторингу матеріальної ефективності;

- відбиток споживання — для моніторингу, чи відповідає споживання в ЄС межах планети.

Нова структура підтримує циркулярну економіку та амбіції ЄС щодо кліматичної нейтральності в рамках Європейської зеленої угоди.

В Україні ж Введення Законом України «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України» з 10 грудня 2021 року заборони на безоплатне розповсюдження пластикових пакетів у магазинах, супермаркетах, інших об'єктах торгівлі, аптеках, закладах громадського харчування та сфері надання послуг стало першим етапом у зменшенні забруднення пластиком навколишнього середовища [13]. Подальша повна заборона у 2022 році на реалізацію об'єктами роздрібною торгівлі, громадського харчування та надання послуг надтонких пластикових пакетів із товщиною стінки менше 15 мікрометрів (виняток — лише первинна упаковка для м'яса, риби, сипучих продуктів, для яких така заборона починає діяти з 1 січня 2023 року) та тонких пластикових пакетів із стінками товщиною від 15 до 50 мікрометрів має призвести до значного скорочення їх виробництва та використання.

Отже, **метою роботи** є оцінка рівня забруднення води мікропластиком та його потенційного впливу на здоров'я людини

Завдання роботи:

- Дослідити появу мікропластику, види мікропластику, його поширеність та вплив, застосування та сферу використання.
- Проаналізувати перші заходи щодо зниження кількості мікропластику та пластику в довкіллі та сучасне європейське законодавство щодо мікропластику.
- Розглянути основні положення Європейського законодавства щодо поводження з пластиком.
- Розглянути основні положення Українського законодавства щодо пластику в довкіллі та мікропластика.
- Охарактеризувати способи виявлення мікропластику в компонентах довкілля та технології очищення гідроекосистем та інших компонентів довкілля від мікропластику.

Об'єкт дослідження:

- Процес забруднення водного середовища мікропластиком та його просторовий розподіл у гідроекосистемах

Предмет дослідження:

- Вплив мікропластику на екосистеми, здоров'я людей та тварин.

РОЗДІЛ І. ЄВРОПЕЙСЬКЕ ЗАКОНОДАВСТВО ЩОДО ПЛАСТИКУ, МІКРОПЛАСТИКУ ТА ЙОГО ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ

1.1. Поява мікропластику, види мікропластику, його поширеність та вплив, застосування та сфера використання

Першу пластмасу було отримано британським металургом і винахідником Александером Парксом у 1855 році. Паркс назвав її «паркезин» (потім стали називати целулоїд). Паркезин вперше було представлено на Всесвітній виставці в Лондоні у 1862 році. Розвиток пластмас почався з використання природних пластичних матеріалів (жувальної гумки, шелаку), далі продовжився використанням хімічно модифікованих природних матеріалів (гума, ебоніт, нітроцелюлоза, колаген, галаліт) і перейшов до повністю синтетичних молекул (бакеліт, епоксидна смола, полівінілхлорид, поліетилен та ін.). Паркезин був торговою маркою першого штучного пластику і був виготовлений з целюлози, обробленої азотною кислотою та розчинником. Паркезин часто називали штучною слоновою кісткою.

За останні шість десятиліть людство виробили понад 8,4 мільярда тонн пластику. Рівень виробництва пластику експоненціально зростає щороку з 1,5 млн. тонн у 1950 році до 359 млн. тонн у 2019 році, більшість з яких є одноразовими пластиками. Більшість з них зараз опинилася на звалищах або безпосередньо в нашому природному середовищі. Насправді лише 9% пластику, який використовується сьогодні, переробляється. Певні данні про пластик графічно представлені на рис. 1.1 та 1.2. Щороку в наші океани потрапляє до 12 мільйонів тонн пластику. Синтетичні матеріали (полімери, мікропластик або пластик) є однією з причин глобального забруднення навколишнього середовища. Плаваючі пластикові континенти в кількох океанах, черепахи, що їдять поліетиленові пакети, мертві кити з пластиковими

сміттєвими шлунками – це відкриття останніх кількох років, які отримали велике висвітлення та увагу в ЗМІ.

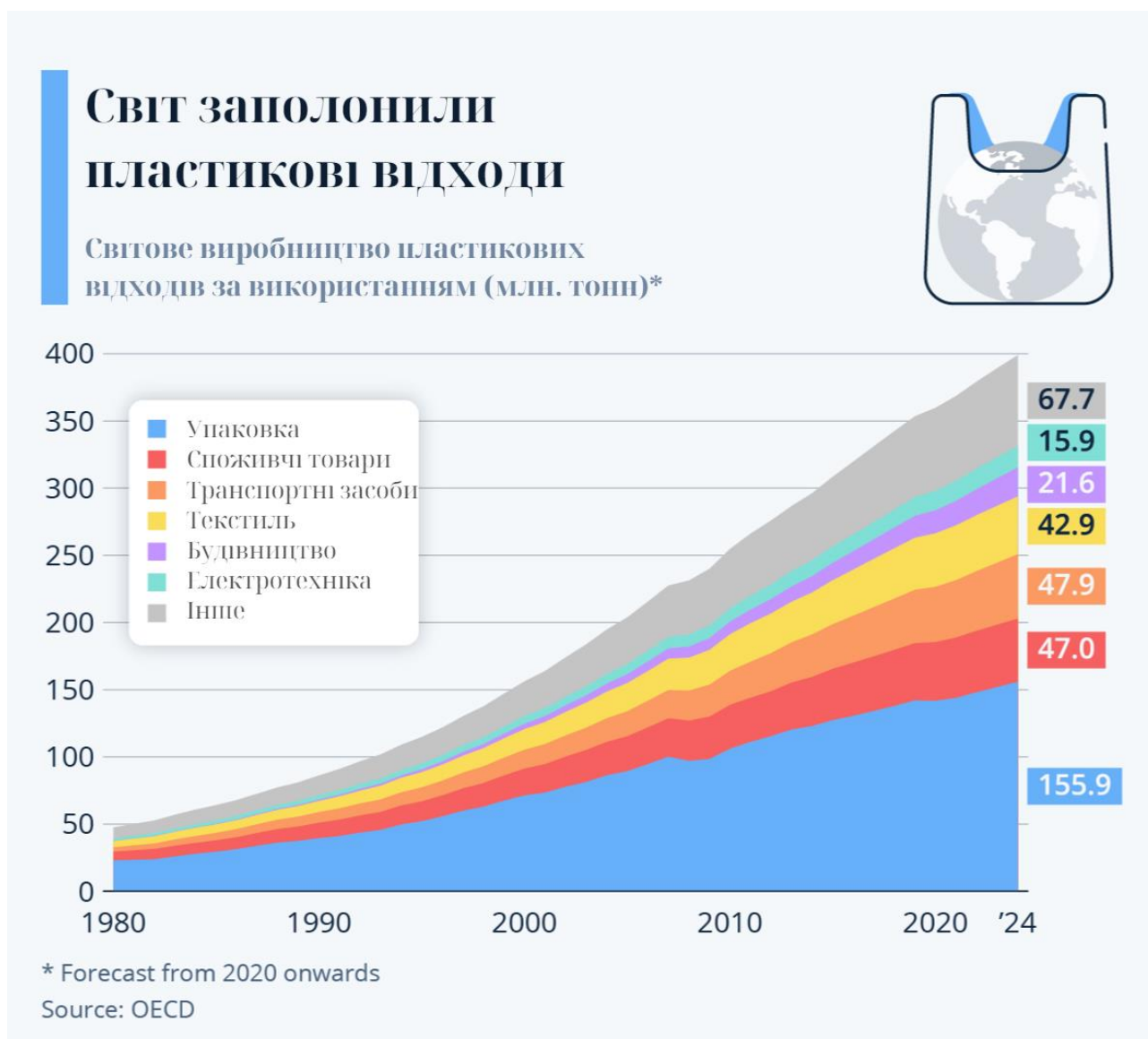


Рис. 1.1 - Пластикові відходи у світі

Це відповідає одному сміттєвозу за хвилину. Пластикові відходи на вулицях також можуть потрапити в океан через дренажні мережі або річки: згідно з оцінками, головні світові річки транспортують до моря до 2,41 мільйона тонн пластику щороку, що відповідає 100 000 сміттєвим машинам.

Вчені зазвичай використовують мікропластик у багатьох сферах, наприклад, в мийних засобах, засобах для обличчя та косметичі, або в технології повітряного очищення, фарби/покриття/чорнило, промислові

абразиви, сільське господарство, фармацевтику, очищення стічних вод і будівництво. На рис. 1.3 зображено один з шляхів потрапляння пластику в навколишнє середовище. У деяких випадках повідомлялося про їх використання в медицині як векторів для ліків [14]. Мікропластикові «скруббери», які використовуються в відлущувальних миючих засобах для рук і скрабах для обличчя, замінили традиційно використовувані натуральні інгредієнти, включаючи мелену мигдалеву шкаралупу, вівсяні пластівці та пемзу.

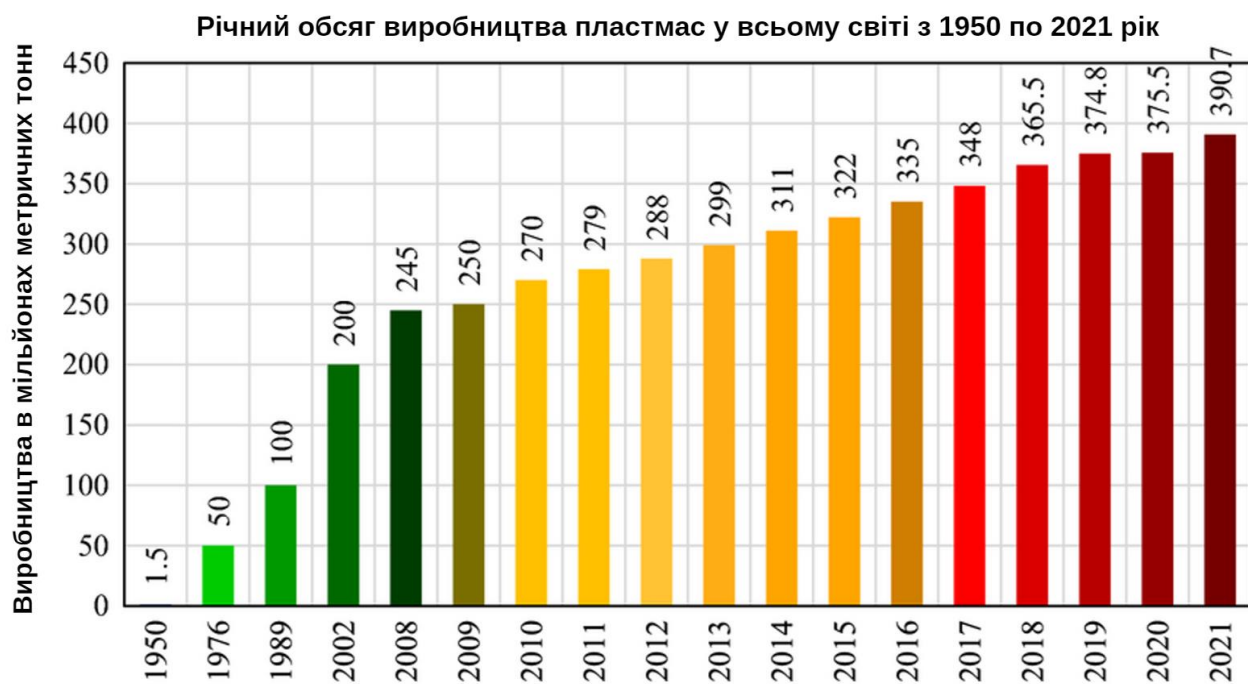


Рис. 1.2 - Глобальне виробництво пластику

Термін «мікропластик» використовується для того, щоб відрізнити мікропластик від більшого пластикового сміття. Більшість людей знають про видиме забруднення пластиком, як-от викинуті пляшки та інші відходи, які викидаються на пляжі, але саме невидимий пластик, ймовірно, становить більший ризик для тварин і рослин, кажуть морські вчені Карен Лавендер Лоу та Річард Томпсон. І вони попереджають, що проблеми лише погіршаться, якщо не буде вжито рішучих заходів для обмеження продажу одноразових пластикових виробів у всьому світі та розвіювання думки про те, що пластикові

відходи можна просто викинути. Мікропластик, імовірно, є найбільш поширеним на сьогоднішній день пластиковим сміттям в океані, і його кількість неминуче зростає.



Рис. 1.3 - Один з шляхів потрапляння пластику в навколишнє середовище

Коли пластик піддається впливу сонця, повітря та моря, більші шматки дробляться або руйнуються на менші. Найдрібніші шматочки, розміром менше 5 міліметрів є мікропластиком. Деякі з них мікроскопічні та проходять через фільтри, призначені для видалення домішок із нашої питної води.

Мікрокульки також є частиною проблеми. Це дуже маленькі шматочки пластику, які використовуються в миючих засобах як відлущувальні засоби. Виявлення мікропластику стало важливою метою досліджень.

Як правило, розмір мікропластику менше 5 мм, він може бути розщеплений до частинок розміром від 1 до 100 нм – нанопластику. За допомогою інструментів моделювання було підраховано, що в океані накопичилося від 15 до 51 трильйона мікрочастинок пластику. Частина

мікрокульок пластику практично не затримуються при фільтрації на очисних спорудах.

Коли пластикові відходи не утилізують, пластик викидають або змивають на вулиці, подвір'я, річки, пляжі та прибережні зони по всьому світу. Пластикове сміття забиває каналізацію та збільшує збитки від повеней у багатьох містах.

В даний час відомі дві класифікації мікропластику. Визнано, що обидва типи зберігаються у навколишньому середовищі у високих рівнях, особливо у водних і морських екосистемах, де вони спричиняють забруднення води [15]. До *первинного мікропластику* належать будь-які пластикові фрагменти або частинки розміром 5,0 мм або менше до потрапляння в навколишнє середовище. До них належать мікрОВОлокна з одягу, мікрокульки та пластикові гранули (також відомі як нурдли) [16-18]. Деякі первинні мікропластики додають до продуктів навмисно, наприклад, мікрокульки, які використовуються в зубних пастах і сонцезахисних кремах. Інший первинний мікропластик утворюється, коли шини зношуються на дорогах або коли одяг стирається в пральній машині [15]. Виробники розробляють первинний мікропластик через унікальні фізичні та хімічні властивості, створені його малим масштабом. Ці властивості включають довговічність, жорсткість і абразивність. Щільність, розмір, форма і склад впливають на його властивості.

Первинний мікропластик також виробляється для використання в технології повітряної обробки. Цей процес передбачає пескоструминне очищення акрилу, меламін або поліефірні мікропластикові скрубери на машинах, двигунах і корпусах човнів для видалення іржі та фарби. Оскільки ці скрубери використовуються неодноразово, доки вони не зменшаться в розмірах і не втратять свою ріжучу здатність, вони часто забруднюються важкими металами, такими як кадмій, хром і свинець [20]. Незважаючи на те, що багато компаній взяли на себе зобов'язання скоротити виробництво мікрогранул,

все ще існує багато біопластикових мікрогранул, які також мають тривалий життєвий цикл розкладання, подібний до звичайного пластику.

Вторинний мікропластик виникає в результаті деградації (руйнування) більших пластикових виробів через природні процеси вивітрювання після потрапляння в навколишнє середовище. До таких джерел вторинного мікропластику належать рибальські сітки, пластикові пакети, контейнери для мікрохвильових печей, чайні пакетики та знос шин [20-24]. З часом кульмінація фізичної, біологічної та хімічної фотодеградації, включаючи фотоокислення, викликане впливом сонячного світла, може зменшити структурну цілісність пластикового сміття до розміру, який зрештою неможливо помітити неозброєним оком [25]. Цей процес руйнування великого пластикового матеріалу на значно менші частини відомий як фрагментація [21].

Вважається, що мікропластик може надалі розкладатися до меншого розміру, хоча найменший мікропластик, який, як повідомляється, виявлений в океанах на даний момент, має діаметр 1,6 мікрметра ($6,3 \times 10^{-5}$ дюймів) [23]. Поширеність мікропластику з нерівними формами свідчить про те, що фрагментація є ключовим джерелом [26].

Є й більші пластикові відходи, наприклад, пластикові пляшки. Цей тип відходів називається макропластиком, і його можна зупинити, запровадивши належне поводження з відходами. 35% усього мікропластику океану походить із текстилю/одягу, головним чином через ерозію одягу на основі поліестеру, акрилу чи нейлону, часто під час процесу прання [27]. Однак мікропластик також накопичується в повітрі та наземних екосистемах. Мікропластик — це майже невидима перешкода, яку непросто подолати. Багато рішень для того, щоб уберегти цей крихітний пластик від водних шляхів, все ще розробляються.

1.2. Перші заходи щодо зниження кількості мікропластику та пластику в довкіллі та сучасне європейське законодавство щодо мікропластику

Океани стикаються з багатьма загрозами, але пластикові відходи є одним із ризиків, який ми можемо зменшити сьогодні, докладаючи більше зусиль. Термін «мікропластик» був введений у 2004 році професором Річардом Томпсоном, морським біологом університету Плімута у Великій Британії [28]. У в 2023 році мікропластик вперше був виявлений у великих кількостях у світовому океані. Це стало очевидним: пластик у навколишньому середовищі не зникає просто так. І не тільки з пластиком, а й з мікропластиком ми маємо справу з екологічною проблемою величезних глобальних масштабів. Пластикові сміття щороку потрапляє в моря у все більших кількостях, і в багатьох країнах через неправильне поводження з твердими відходами контроль за ними недостатній. Цей тип забруднення може початися непомітно, як, наприклад, пляшка води на полиці магазину. Потім вона буде викинутою на вулицю чи в парк і почати свій довгий шлях вниз по річках до морів і океанів. Пандемія COVID-19 посилює проблему через неправильну утилізацію засобів захисту, як-от масок.

У всьому світі пандемія COVID-19 призвела до збільшення попиту на одноразові пластмаси, такі як маски для обличчя, рукавички та захисні маски. Відходи, що утворюються в результаті, деякі з яких потрапляють у річки та океани, посилюють тиск на вже неконтрольовану глобальну проблему пластику. Хоча багато дослідників підозрюють, що буде масовий приплив неправильно оброблених пластикових відходів, пов'язаних з COVID, нове дослідження є першим, яке прогнозує масштаби та долю відходів в океанах.

На жаль, коронавірусна криза посилює проблему пластику. За оцінками Всесвітнього фонду дикої природи, якщо 1% із мільярдів вироблених масок викинути на землю, це за місяць може забруднити навколишнє середовище в кількості до 10 тисяч масок. Що ще гірше, більшість пластикових матеріалів, які виготовляються для захисту населення та медичних працівників, як-от рукавички, маски для обличчя та халати, є одноразовими пластиковими речами, які одягаються один раз і викидаються [15].

У Європейському Союзі багато мікропластику вловлюється системами збору зливових або стічних вод і транспортується на очисні споруди, які можуть вловлювати до 99% дрібних частинок. Уловлений мікропластик потрапляє в мул, який виробляють очисні споруди, і оскільки цей мул часто використовують як добриво для ферм, він може повернутися у воду через стоки. Таким чином, частина мікропластику в мулі може потрапляти у водні шляхи навіть після того, як очисні споруди виконають свою роботу.

Забруднення океанів крихітними шматочками пластикового сміття зараз настільки поширене, що, на думку вчених, лише радикальні дії щодо усунення відходів у джерелі можуть обмежити подальшу шкоду морській дикій природі. Мікропластик зараз з'являється у всіх великих світових океанах, включаючи Арктику та Антарктику.

Європейський союз вживав ряд заходів для зменшення кількості мікропластику та пластику в довкіллі. Ось кілька загальних напрямків дій:

1. Одиначне використання пластику.

ЄС прийняв Директиву про одноразове використання пластику, яка вимагає заборони або обмеження використання одноразових пластикових виробів, таких як сміттєві пакети, стакани, тарілки, трубочки тощо. З 3 липня 2021 року одноразові пластикові тарілки, столові прибори, соломинки, палички для повітряних кульок і ватяні палички не можуть бути розміщені на ринках країн-членів ЄС. Крім того, така ж міра стосується чашок, контейнерів для їжі та напоїв із пінополістиролу та всіх виробів із пластику.

Одноразові пластикові вироби повністю або частково виготовлені з пластику і зазвичай призначені для одноразового використання або протягом короткого періоду часу, перш ніж їх викинуть. Згідно з новими правилами заборонені певні одноразові пластикові вироби, для яких існують альтернативи. Також вводяться конкретні заходи щодо скорочення вживання деяких продуктів.

Одноразові пластикові вироби (SUP) використовуються одноразово або протягом короткого періоду часу, перш ніж їх викидають. Вплив цих пластикових відходів на навколишнє середовище та наше здоров'я є глобальним і може бути кардинальним. Одноразові пластикові вироби з більшою ймовірністю потраплять у наші моря, ніж багаторазові. 10 одноразових пластикових предметів, які найчастіше зустрічаються на європейських пляжах, разом із рибальським спорядженням, складають 70% усього морського сміття в ЄС.

Правила ЄС щодо одноразових пластикових виробів спрямовані на запобігання та зменшення впливу певних пластикових виробів на навколишнє середовище, зокрема на морське середовище, та на здоров'я людини.

Вони також спрямовані на сприяння переходу до циркулярної економіки з інноваційними та стійкими бізнес-моделями, продуктами та матеріалами, таким чином також сприяючи ефективному функціонуванню внутрішнього ринку.

Закон

- Директива щодо одноразового пластику [29]
- Короткий зміст Директиви щодо одноразового пластику [30]
- Імплементацийний регламент, що встановлює правила щодо гармонізованих специфікацій маркування одноразових пластикових виробів, перелічених у частині D Додатку до Директиви, та виправлення до цього імплементацийного регламенту [31]
- Оцінка впливу частина 1 - частина 2 - частина 3 і резюме [32]
- Імплементacyjne рішення 2021/1752, що встановлює правила обчислення, перевірки та звітності щодо роздільного збору відходів одноразових пластикових пляшок для напоїв [33]

Суміжне право

- Директива щодо упаковки [34]
- Директива про поліетиленові пакети [35]

2. Відповідальність виробників

Введено систему розширеної відповідальності виробників (Extended Producer Responsibility, EPR), яка зобов'язує виробників пластику брати на себе відповідальність за вироблені ними вироби в кінцевому вигляді та їхнє подальше утилізування.

Концепція була вперше офіційно представлена у Швеції Томасом Ліндквістом у звіті 1990 року для Міністерства навколишнього середовища Швеції [36]. У наступних звітах, підготовлених для Міністерства, з'явилося таке визначення: «[EPR] — це стратегія захисту навколишнього середовища, спрямована на досягнення екологічної мети щодо зменшення загального впливу продукту на навколишнє середовище шляхом покладання на виробника продукту відповідальності за протягом усього життєвого циклу продукту, особливо для повернення, переробки та остаточної утилізації» [37].

3. Заборона мікропластику у косметичних виробах

У січні 2018 року Європейська комісія ініціювала процедуру обмеження мікропластику в косметичці. Згідно зі Стратегією Європейського Союзу (ЄС) щодо пластмас, опублікованою в січні 2018 року, Європейська комісія звернулася до Європейського хімічного агентства (ЕЧА) з проханням підготувати досьє для обмеження мікропластику в певних продуктах. Згідно з рішенням Суду Європейської асоціації вільної торгівлі (ЄАВТ) у справі Наглядний орган ЄАВТ проти Королівства Норвегія 1, Комісія має розпочати цю процедуру у випадку національного заходу, що обмежує використання та розміщення на ринку хімічних речовин членом Держава. Після повідомлення в листопаді 2016 року Франція, як перша країна-член ЄС, запровадила обмеження на використання мікропластику в певних косметичних засобах і засобах особистої гігієни, так званих змивних засобах для відлущування або очищення. Французька заборона була повідомлена Комісії відповідно до Директиви 2015/1535, яка вимагає від держав-членів ЄС повідомляти про «будь-який проект технічного регламенту», щоб оцінити вплив запропонованого регламенту на ринок. Франція також повідомила Світову

організацію торгівлі (COT) відповідно до статті 10(6) Угоди про технічні бар'єри в торгівлі (Угода ТБТ). 3 В обох повідомленнях заборона на використання мікропластику в косметичних продуктах, які змиваються, тобто продуктах, які змиваються відразу після використання, була обґрунтована посиланням на міжнародні та європейські зобов'язання щодо стану морського середовища. Інші країни-члени оголосили про подібне законодавство. Крім того, країни, що не входять до ЄС, такі як Сполучені Штати, Канада, Південна Корея та Нова Зеландія, або повідомили, або вже ввели в дію правила, які забороняють певний мікропластик у певних косметичних продуктах. Були прийняті заходи для заборони використання деяких видів мікропластику у косметичних та гігієнічних засобах.

4. Покращення утилізації та переробки пластику

Європейський союз також вдосконалює системи утилізації та переробки пластику для зменшення викидів і поліпшення управління відходами. Збільшення рівня переробки є критично важливою стратегією для вирішення проблем, спричинених забрудненням пластиком, але є кілька технічних обмежень, які необхідно подолати. У харчовій упаковці природні полімери з чудовими газонепроникними властивостями та здатністю до самоочищення були введені як екологічно чиста альтернатива існуючим матеріалам і для зменшення забруднення харчових продуктів. Для перетворення пластикових відходів на продукти з високою доданою вартістю з'явилися підходи до переробки та валоризації. Останні досягнення в розробці високоякісних пластмас, які можна переробляти, включають розробку супертехнічних термопластів і інженерних хімічних зв'язків реактопластів, щоб зробити їх придатними для вторинної переробки та біологічного розкладання. Потрібні подальші дослідження, щоб розробити більш економічно ефективні та масштабовані технології для вирішення проблеми забруднення пластиком шляхом сталої переробки та вторинної переробки.

Висновки до розділу

На відміну від значної кількості повсякденно видимого у нашому житті пластикового сміття, забрудненню навколишнього середовища мікропластиком та оцінці його впливу на здоров'я людини досі приділяється недостатньо уваги. Величезна кількість часточок, різноманітних за складом, розмірами, формою поверхні, з адсорбованими на них хімічними речовинами та мікроорганізмами, створює проблему в оцінці реального забруднення харчових продуктів, повітря та води. Така невизначеність стосовно причинно-наслідкового зв'язку усього комплексу факторів реального мікропластикового забруднення і його потенційно шкідливого впливу на стан здоров'я людей вимагає продовження вивчення цих складних взаємозв'язків в умовах реального життя.

У той час як вплив пластикового сміття на природне навколишнє середовище є очевидним, останнім часом все більше уваги приділяється аналізу впливу мікропластику на здоров'я людей. Такі загрози пов'язані як із надходженням мікрочастинок пластику з водою, через харчовий ланцюг та з повітрям при вдиханні пилу. Разом із тим більшість населення не усвідомлює реальної величини проблеми, адже мікропластикове сміття ще залишається поза увагою соціальної реклами, яка популяризує вирішення глобальної проблеми забруднення, не акцентуючи увагу на негативних впливах для здоров'я людини. Така тенденція може достатньо швидко змінитися через прискіпливу увагу науковців до цієї проблеми та зростання кількості публікацій, що допоможе вплинути на розвиток законодавчої бази, створення більш жорстких вимог до виготовлення, використання та утилізацію пластику.

Європейський союз вживав ряд заходів для зменшення кількості мікропластику та пластику в довкіллі. Ось кілька загальних напрямків дій:

1. Одиначне використання пластику. ЄС прийняв Директиву про одноразове використання пластику, яка вимагає заборони або обмеження

використання одноразових пластикових виробів, таких як сміттєві пакети, стакани, тарілки, трубочки тощо.

2. Відповідальність виробників. Введено систему розширеної відповідальності виробників (Extended Producer Responsibility, EPR), яка зобов'язує виробників пластику брати на себе відповідальність за вироблені ними вироби в кінцевому вигляді та їхнє подальше утилізування.
3. Заборона мікропластику у косметичних výroбах. Були прийняті заходи для заборони використання деяких видів мікропластику у косметичних та гігієнічних засобах.
4. Покращення утилізації та переробки пластику. Європейський союз також вдосконалює системи утилізації та переробки пластику для зменшення викидів і поліпшення управління відходами.

РОЗДІЛ II. УКРАЇНСЬКЕ ЗАКОНОДАВСТВО ЩОДО ПЛАСТИКУ, МІКРОПЛАСТИКУ ТА ЙОГО ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ

2.1. Основні положення українського законодавства щодо пластику та мікропластика. Законодавчі норми України щодо обмеження використання одноразового пластику

Наразі не існує конкретного законодавства в Україні, що б присвячувалося виключно питанням пластику та мікропластика. Однак, було кілька законодавчих ініціатив та стандартів, які вказують на зростаючу увагу до цих проблем:

1) Стратегія управління відходами в Україні

Стратегія передбачає зменшення кількості сміття та підтримку переробки відходів, але може не бути конкретно спрямованою на пластик. Стратегія має на меті впровадження системного підходу до поводження з відходами на державному та регіональному рівнях, зменшення обсягів утворення відходів шляхом збільшення обсягу їх переробки та повторного використання.

2) Закон України «Про охорону атмосферного повітря»

Містить положення щодо обмеження викидів шкідливих речовин, включаючи ті, які можуть виникнути в процесі виробництва та переробки пластику.

3) Стандарти щодо безпеки продукції

Україна приймає європейські стандарти та норми безпеки, які також можуть включати вимоги щодо використання та обігу пластику.

4) Національний план дій з питань раціонального використання та управління хімічними речовинами в Україні до 2025 року

Може містити заходи щодо мікропластика та хімічних відходів.

Загалом ця підтема охоплює основні нормативно-правові акти України, які регулюють питання поводження з пластиком та мікропластиком. До таких актів належать, зокрема закон України «Про управління відходами». В цьому законі пластик відносять до побутових відходів але побутові відходи не включають відходи промисловості, сільського і лісового господарства, рибальства та аквакультури, резервуарів для септиків, каналізаційних мереж та відходи їх оброблення, включаючи осад стічних вод, транспортні засоби, строк експлуатації яких закінчився, відходи будівництва та знесення, вуличний змет, медичні відходи.

Також в українському законодавстві є й інші нормативно-правові акти такі як, закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», технічний регламент щодо обмеження використання деяких видів одноразового пластикового посуду та інших виробів з пластику до проекту Закону України «Про обмеження виробництва та обігу пластикової продукції одноразового використання на території України» який було знято з розгляду 05.09.2023 року.

Щодо обмеження використання одноразового пластику в Україні діють певні законодавчі норми:

- 1) Закон України від 03.06.2020 № 1489-IX «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України» (Закон) (рис. 2.1). Закон забороняє використання у сфері торгівлі надтонких пластикових пакетів (товщина стінок до 15 мікрометрів), а також тонких пластикових пакетів, крім тих, що призначені для пакування та/або

транспортування свіжої риби, м'яса та продуктів із них, сипучих продуктів, льоду, а також для пакування товарів у роздрібній торгівлі як первинна упаковка [38].

2) Закон України від 17.09.2021 №6077 «Про обмеження виробництва та обігу пластикової продукції одноразового використання на території України». Закон передбачає заборону на обіг та розповсюдження одноразових пластикових виробів, таких як:

- ватні палички;
- соломинки;
- одноразовий посуд;
- харчові контейнери;
- контейнери та ємності для напоїв з пінополістиролу.
- Заборона на обіг одноразових пластикових виробів, передбачена Законом № 2229-IX, набере чинності з 1 січня 2024 року.

Але цей закон було знято з розгляду 05.09.2023.

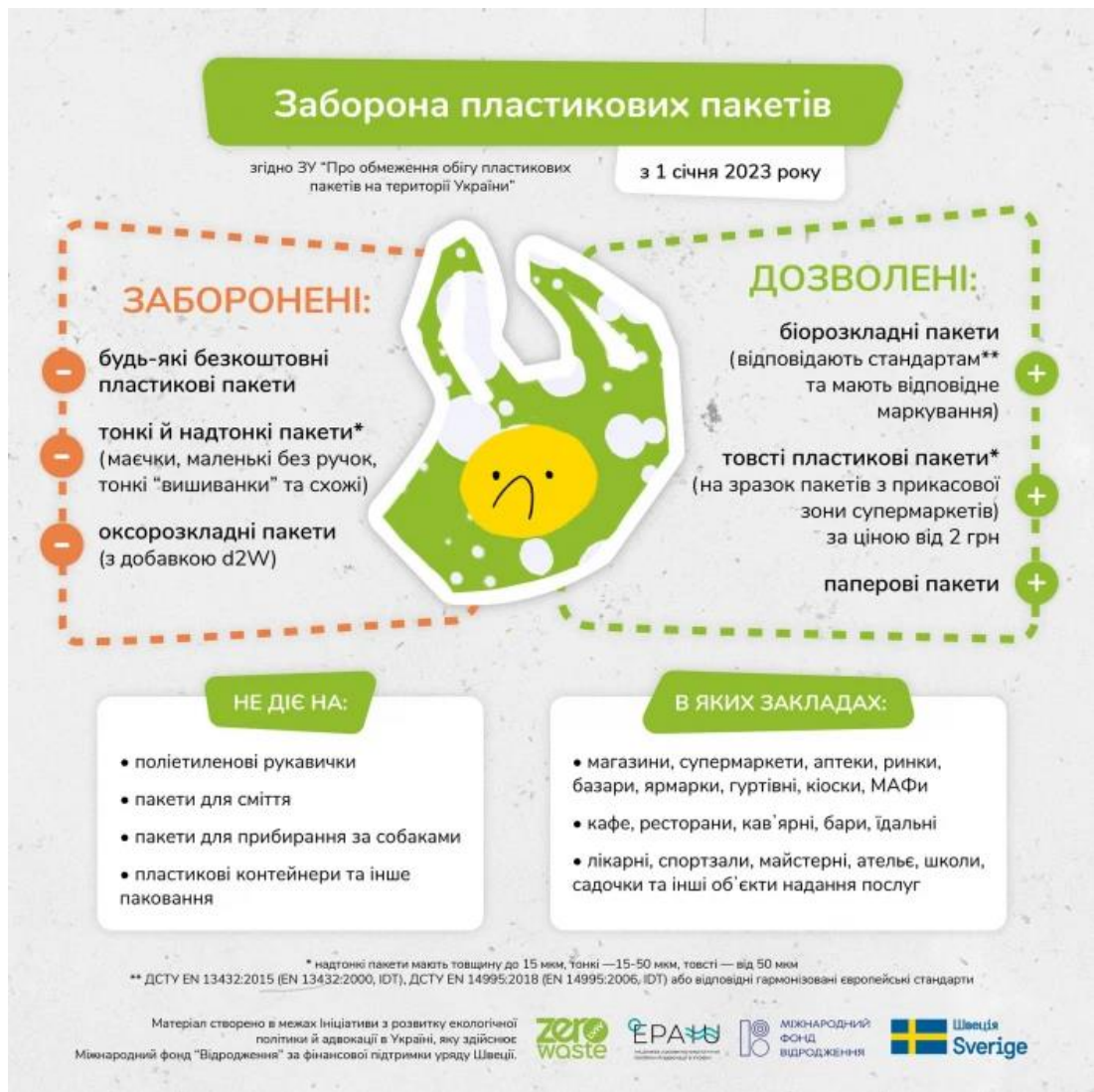


Рис. 2.1 Агітуючий плакат до Закон України «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України»

Крім того, в Україні діють інші нормативно-правові акти, які містять положення щодо обмеження використання одноразового пластику, зокрема державні стандарти України (ДСТУ), які встановлюють вимоги до одноразових пластикових виробів, зокрема:

- ДСТУ EN 16064:2022 (EN 16064:2011, IDT) Упаковка. Жорсткі пластикові контейнери. PET оброблення 30/25 High (18,5).
- ДСТУ EN ISO 18830:2022 (EN ISO 18830:2017, IDT; ISO 18830:2016, IDT) Пластмаси. Визначення аеробної біодеградації неплаваючих пластикових матеріалів на поверхні розділу (морська вода/піщаний

осад). Метод вимірювання потреби в кисні в закритому респірометр.

- ДСТУ EN ISO 19679:2022(EN ISO 19679:2020, IDT;ISO 19679:2020, IDT) Пластмаси. Визначення аеробного біорозкладання неплаваючих пластикових матеріалів на межі поділу морської води та відкладень. Метод аналізу діоксиду вуглецю, що виділяється.
- ДСТУ EN ISO 22526-2:2022(EN ISO 22526-2:2021, IDT;ISO 22526-2:2020, IDT) Пластмаси. Вуглецевий і екологічний слід біопластику. Частина 2. Матеріальний вуглецевий слід, кількість (маса) CO₂, видаленого з повітря та включеного в молекулу полімеру.
- Та інші.

Законодавчі норми щодо обмеження використання одноразового пластику спрямовані на зменшення негативного впливу цього виду відходів на навколишнє середовище. Вони передбачають поступове зменшення використання одноразового пластику та його заміну на альтернативні матеріали, які є більш екологічними.

Однак, є ймовірність, що з часом уряд може прийняти більше конкретних нормативних актів, орієнтованих на проблеми пластику та мікропластика, особливо в контексті зростаючої свідомості щодо екологічних проблем у всьому світі. Рекомендується слідкувати за оновленнями у законодавстві та ініціативах з цих питань в Україні. Прийняття законодавчих заходів для зменшення кількості пластику в навколишньому середовищі є важливим етапом у розв'язанні проблеми забруднення пластиком.

2.2. Імплементация українського законодавства щодо пластику та мікропластика. Боротьба з мікропластиком: законодавчі заходи та їх реалізація

Імплементація українського законодавства щодо пластику та мікропластика здійснюється шляхом розробки та впровадження нормативно-правових актів, які конкретизують положення основного законодавства, створення системи контролю за дотриманням законодавства щодо пластику та мікропластика, проведення інформаційно-просвітницьких заходів щодо проблем забруднення пластиком та мікропластиком.

В Україні робота з імплементації законодавства щодо пластику та мікропластика триває. У 2022 році Верховна Рада України прийняла Закон України «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України» [38]. Цей Закон забороняє розповсюдження в об'єктах роздрібної торгівлі, громадського харчування та надання послуг надтонких, тонких та оксидорозкладних пластикових пакетів.

У 2023 році Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України розробило проект Національного плану дій щодо зменшення забруднення пластиком та мікропластиком. Цей План визначає основні заходи, які будуть реалізовані в Україні в рамках боротьби з забрудненням пластиком та мікропластиком. Боротьба з мікропластиком є однією з найважливіших екологічних проблем сучасності. Мікропластик потрапляє в навколишнє середовище в результаті різних процесів, зокрема:

- Знос автомобільних шин, одягу та інших предметів, виготовлених з пластику.
- Розпад більших пластикових предметів, таких як пластикові пакети, пляшки та посуд.
- Вивільнення мікропластика з косметичних засобів, таких як ексfolіанти та зубні паст.
- Мікропластик становить значну загрозу для довкілля та здоров'я людини. Він може потрапити в харчові продукти, воду та повітря, а потім накопичуватися в організмі тварин та людей.

Для боротьби з мікропластиком уряди багатьох країн світу вживають законодавчих заходів. Ці заходи спрямовані на зменшення викидів мікропластика в навколишнє середовище та його впливу на довкілля та здоров'я людини.

Однією з найпоширеніших форм законодавчих заходів є заборона на використання одноразових пластикових виробів, таких як пластикові пакети, соломинки, одноразовий посуд та контейнери. Наприклад, в Україні заборона на використання надтонких пластикових пакетів (товщина стінок до 15 мікрометрів) набула чинності з 1 січня 2021 року. З 1 січня 2024 року в Україні також заборониться використання інших одноразових пластикових виробів, таких як ватні палички, соломинки, одноразовий посуд, харчові контейнери та контейнери та ємності для напоїв з пінополістиролу.

Крім того, уряди багатьох країн світу вживають заходів щодо зменшення викидів мікропластика з косметичних засобів. Наприклад, Європейський Союз планує заборонити використання мікропластику в косметичних засобах з 2025 року. Реалізація законодавчих заходів щодо боротьби з мікропластиком є складним завданням. Воно вимагає спільних зусиль урядів, бізнесу та громадськості.

Так, прийняття законодавчих заходів для зменшення кількості пластику в навколишньому середовищі є важливим етапом у розв'язанні проблеми забруднення пластиком. Ось деякі аспекти та можливі заходи, які можуть бути впроваджені для реалізації законодавчих заходів щодо боротьби з мікропластиком:

- 1) Розробка та впровадження ефективних систем збору та сортування відходів. Це дозволить зменшити кількість мікропластика, який потрапляє в навколишнє середовище.
- 2) Заохочення використання альтернативних матеріалів, які не містять мікропластику. Це може включати використання паперу, біорозкладних матеріалів та інших матеріалів, які є більш

екологічними. Встановлення податків чи інших заохочень для підприємств, які виробляють альтернативні, біорозкладні матеріали або пропонують упаковку з мінімальним вмістом пластику.

- 3) Просвітницька робота серед населення про негативний вплив мікропластика на довкілля та здоров'я людини. Це допоможе підвищити обізнаність населення про проблему мікропластику та знизити його споживання.
- 4) Залучення уваги до проблеми мікропластику та впровадження ефективних заходів щодо її вирішення є важливим завданням для збереження довкілля та здоров'я людини.
- 5) Заборона або обмеження одноразового пластику. Введення заборони або обмеження використання пластикових продуктів для одноразового використання, таких як пластикові посудини, столові прибори, трубочки тощо.
- 6) Стимулювання переробки. Прийняття законодавства, що сприяє розвитку та впровадженню переробних технологій для пластику та надання підтримки переробникам.
- 7) Обмеження використання мікропластику. Встановлення норм та стандартів, що обмежують використання мікропластику в косметичних та чистячих засобах та інших товарах.
- 8) Інформаційні кампанії. Внесення положень щодо обов'язкових інформаційних кампаній та маркування продукції, щоб сприяти усвідомленню споживачів щодо проблем забруднення пластиком.
- 9) Відповідальність виробників. Встановлення відповідальності виробників за життєвий цикл їхніх продуктів, включаючи відповідальність за збір та переробку використаного пластику.
- 10) Створення заходів для підтримки використання вторинної сировини у виробництві пластикових товарів. Ці заходи можуть сприяти

зменшенню негативного впливу пластику на довкілля та сприяти сталому використанню ресурсів.

Боротьба з мікропластиком в Україні є однією з пріоритетних задач у галузі охорони навколишнього середовища. Для вирішення цієї проблеми в Україні впроваджуються законодавчі заходи, спрямовані на зменшення викидів мікропластика в навколишнє середовище.

Імплементация законодавства щодо пластику та мікропластика в Україні може включати кілька етапів та заходів для ефективного впровадження та дотримання законодавчих норм. Деякі ключові етапи і можливі заходи представлені в таблиці 2.1:

Таблиця 2.1

Ключові етапи і можливі заходи імплементация законодавства щодо пластику та мікропластика в Україні

Ключові етапи	Можливі заходи
1	2
Прийняття та розробка законів	Розробка та прийняття конкретних законів та нормативів, що регулюють використання пластику та мікропластику. Ці закони можуть включати заборони, обмеження та стимулювання альтернатив.

Продовження таблиці 2.1

1	2
Створення механізмів контролю та виконання	Відповідальні за моніторинг, контроль та виконання законодавства. Це може включати інспекційні служби, які перевіряють підприємства та дотримання законодавства
Публічні кампанії та освітні програми	Розробка та впровадження інформаційних кампаній для усвідомлення громадськості щодо

	проблеми пластику та мікропластику. Це може включати інформаційні буклети, рекламу, освітні програми у школах та інші заходи.
Розвиток інфраструктури для збору та переробки	Вдосконалення системи збору використаного пластику та розширення мережі пунктів переробки. Забезпечення зручного доступу для громадян до місць збору та вивозу використаного пластику.
Співпраця з промисловістю	Залучення представників промисловості до розробки та впровадження відповідних технологій та стандартів, які дозволять зменшити використання пластику та забезпечити його безпечну переробку.
Моніторинг та оновлення	Регулярний моніторинг ефективності заходів та законодавчих норм з метою їхнього вдосконалення або оновлення відповідно до змін в суспільних потребах та технологічних можливостей.

Імплементація цих заходів вимагає координації різних галузей уряду, співпраці з бізнесом та активної участі громадськості для досягнення загальної мети — зменшення впливу пластику на навколишнє середовище.

2.3. Необхідність прийняття Закону України «Про управління відходами»

В антропоцені забруднення пластиком є глобальною проблемою, яку необхідно вирішувати з різних точок зору, об'єднуючи різні галузі науки. Мікробна трансформація полімерів є дослідницькою темою широкого спектру, яка стала наріжним каменем в економіці замкнутого циклу пластику на основі

викопних корисних копалин і на біологічній основі. Щоб провести відкриту дискусію на ці теми, експерти з синтезу полімерів та біодеградації лігноцелюлози та пластмас зібралися в рамках Транснаціональної мережі досліджень та інновацій у галузі мікробного біорізноманіття, технології ферментів та науки про полімери (MENZYPOL-NET), яка нещодавно була створена вченими з Колумбії та Німеччини. У цьому контексті 27 вересня 2021 року на платформі Zoom відбувся міжнародний воркшоп «Мікробний синтез та деградація полімерів: на шляху до сталої біоекономіки». Воркшоп був поділений на дві секції, і були поставлені питання для обговорення з учасниками дискусії та гостями-експертами. Було висловлено кілька ключових моментів та відповідних точок зору, які в основному стосувалися:

- мікробної еволюції, спричиненої забрудненням пластиком;
- релевантність та взаємодія між структурою/складом полімеру, ферментативними механізмами та методами оцінки біодеградації пластику;
- переробка та оцінка пластикових відходів;
- інженерні ферменти, що розкладають пластмаси;
- вплив (мікро)пластику на мікробіом навколишнього середовища;
- виділення мікробів, що розкладаються пластиком (PD), та дизайн мікробних консорціумів PD;
- синтез та застосування пластику на біологічній основі. Нарешті, пріоритети досліджень з цих ключових точок були визначені в рамках мікробних, ферментних і полімерних наук.

У 2020 році у світі було вироблено близько 400 мільйонів метричних тонн (тонн) синтетичного пластику, а після пандемії коронавірусної хвороби 2019 (COVID-19) очікується подальше збільшення до майже 600 тонн на рік до 2050 року [39]. В даний час багатьом екосистемам по всьому світу (наприклад, океани, прісна вода, мангрові зарості, коралові рифи, сільськогосподарські ґрунти, ліси, полярні регіони та атмосфера) загрожує забруднення пластиком. Це може негативно позначитися на живій природі біосфери; Наприклад,

морські тварини (наприклад, птахи, ссавці та риби) можуть проковтнути пластикове сміття або заплутатися в пластикових рибальських сітках, спричинивши смерть від голоду або задухи [40]. У природі пластикове сміття може бути перетворено на мікропластик (мікропластик; визначається як частинки розміром до 5 мм) шляхом фізичної та хімічної ерозії. Мікропластик і нанопластик (наночастинки; частинки <100 нм) можуть служити поглиначем токсичних сполук, збільшуючи їх негативний вплив на наземне і морське середовище [41]. Ці крихітні частинки також можуть виділятися під час використання пластикових виробів (наприклад, волокна з текстилю або зносу шин) [42-43] і широко поширені на нашій планеті, в тому числі були виявлені в крові людини [44]. Незважаючи на те, що наночастинки не були широко виміряні в навколишньому середовищі, зростає занепокоєння, що вони можуть бути більш небезпечними, ніж мікропластик, головним чином через їх потенційну здатність проникати в біологічні мембрани [45].

Закон України № 187/98-ВР «Про відходи» прийнятий 5 березня 1998 року, регулює правові, організаційні та економічні засади діяльності, пов'язаної з утворенням, збиранням, перевезенням, зберіганням, обробленням, утилізацією та видаленням відходів з метою запобігання їх шкідливому впливу на навколишнє природне середовище та здоров'я людини. Основні положення:

- Визначення понять та термінів, пов'язаних з відходами.
- Правові засади управління відходами на національному, регіональному та місцевому рівнях.
- Обов'язки суб'єктів господарювання у сфері поводження з відходами.
- Вимоги до утилізації та видалення відходів.
- Контроль і нагляд у сфері поводження з відходами.

До прийняття Закону України «Про управління відходами» існували кілька ключових етапів і проблем, пов'язаних з мікропластиком:

1. Нестача законодавства

Більшість країн не мали специфічних законів або регуляцій щодо мікропластику. Законодавство було орієнтоване на загальне управління відходами та охорону навколишнього середовища, але не враховувало специфічні проблеми, пов'язані з мікропластиком.

Відповідно до статті 16 Конституції України [46] необхідність забезпечення екологічної безпеки та підтримання екологічної рівноваги на території України, подолання наслідків Чорнобильської катастрофи – катастрофи планетарного масштабу, збереження генофонду Українського народу є обов'язок держави. Відповідно до розпорядження Кабінету Міністрів України № 820-р від 08.11.2017 схвалено Національну стратегію поводження з відходами в Україні до 2030 року, яка спрямована на необхідність вирішення критичної ситуації, що склалася з утворенням, накопиченням, зберіганням, переробкою, утилізацією та захороненням відходів, розвиток екологічних загроз.

Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», зокрема стаття 55, містить обов'язки для суб'єктів права власності на відходи, які зобов'язані вживати дієвих заходів щодо зменшення обсягів утворення відходів, а також заходів щодо їх утилізації та знешкодження. Закон України «Про відходи» визначає основні принципи державної політики щодо відходів, а саме: забезпечення збирання та розміщення відходів; мінімізація утворення відходів; організація контролю за розміщенням відходів тощо. Закон вніс низку певних змін. Так, відповідно до закону, спалювання побутових відходів в Україні дозволено лише в енергетичних цілях з метою виробництва теплової та/або електричної енергії. Забороняється проектування, будівництво та експлуатація полігонів побутових відходів без обладнання систем захисту ґрунтових вод та знешкодження біогазу. Ці зміни до законодавства в Україні були вкрай необхідні. Проте недоліком є те, що вимоги нового законодавства не реалізуються на практиці, невідповідність в деяких аспектах Європейського законодавства. В цьому законі навіть немає вивчення пластик чи мікропластик.

2. Наукові дослідження

Впродовж 2000-х і 2010-х років почали з'являтися численні наукові дослідження, які виявили наявність мікропластику в океанах, річках та навіть у питній воді. Ці дослідження підкреслювали потенційну шкоду мікропластику для екосистем та здоров'я людини. Хоча кількість публікацій про пластик та мікропластик в Україні значно зросла лише в останні роки, період 2000-2010 років також був свідком певних досліджень у цій галузі. Ось декілька прикладів:

1) 2000 рік:

- Вплив пластикового сміття на Чорне море. Дослідники з Інституту біології моря НАН України вивчили вплив пластикового сміття на морські екосистеми Чорного моря. Вони виявили, що пластик шкодить морським тваринам, які його ковтають, а також забруднює морське середовище.

2) 2002 рік:

- Мікропластик у ґрунті України. Дослідники з Національного університету «Львівська політехніка» виявили мікропластик у ґрунті в різних регіонах України. Вони припустили, що мікропластик потрапляє в ґрунт з ґрунтових вод, а також з мулу та компосту, який містить пластик.

3) 2005 рік:

- Вплив мікропластику на здоров'я риб. Дослідники з Інституту гідробіології НАН України вивчили вплив мікропластику на здоров'я риб. Вони виявили, що мікропластик може накопичуватися в тканинах риб і негативно впливати на їхнє здоров'я та розмноження.

4) 2007 рік:

- Розробка методів видалення мікропластику з води. Дослідники з Київського національного університету імені Тараса Шевченка розробили методи видалення мікропластику з води. Ці методи можуть бути використані для очищення питної води та стічних вод.

5) 2010 рік:

- Підвищення обізнаності про проблему пластикового забруднення. Некомерційні організації, такі як Українська екологічна група, почали активно працювати над підвищенням обізнаності про проблему пластикового забруднення в Україні. Вони проводили кампанії та організовували заходи з очищення довкілля.

3. Громадська свідомість і активізм

Зростання обізнаності громадськості про проблему мікропластику призвело до підвищення тиску на уряди та компанії з вимогою вжити заходів. Екологічні організації та активісти зіграли важливу роль у приверненні уваги до цієї проблеми. Вчені почали активно досліджувати проблему пластикових відходів, особливо мікропластику, і публікувати свої висновки у наукових журналах та ЗМІ.

Це включало дослідження про вплив пластику на морське життя, забруднення океанів і потенційні ризики для здоров'я людини. Впливові статті в газетах, журналах та онлайн-ресурсах також допомогли привернути увагу широкої аудиторії до цієї проблеми. З поширенням соціальних мереж активісти почали використовувати платформи, такі як Facebook, Twitter та YouTube, для підвищення обізнаності та організації кампаній. Онлайн-петиції та кампанії стали ефективним засобом впливу на громадську думку та політиків. Деякі ключові події та тенденції цього періоду представлені в таблиці 2.2.

Ці дії та ініціативи створили базу для подальшого розвитку законодавства і регуляцій щодо пластику у наступному десятилітті. Громадська свідомість і активізм значною мірою сприяли зміні ставлення до пластику і пошуку більш сталих альтернатив.

Таблиця 2.2

Ключові події та тенденції періоду 2000-2010

Рік	Подія
1	2

1998	Був прийнятий Закон України «Про відходи». Цей Закон визначає правові, організаційні та економічні засади діяльності, пов'язаної із запобіганням або зменшенням обсягів утворення відходів, їх збиранням, перевезенням, зберіганням, сортуванням, обробленням, утилізацією та видаленням, знешкодженням та захороненням, а також з відверненням негативного впливу відходів на навколишнє природне середовище та здоров'я людини на території України [47].
2008	Була прийнята Постанова Кабінету міністрів України «Про затвердження Правил надання послуг з поводження з побутовими відходами», який встановив правову основу для поводження з відходами в Україні, включаючи пластик.
2010	Українська асоціація переробників відходів (УАПВ) була заснована для сприяння розвитку переробки відходів в Україні, включаючи переробку пластику.
2015	Була заснована громадська організація «Еко-Україна», яка працює над екологічними проблемами, включаючи забруднення пластиком.
2017	Була прийнята Національна стратегія поводження з муніципальними твердими побутовими відходами до 2030 року, яка

Продовження таблиці 2.2

1	2
	визначила мету щодо збільшення кількості відходів, що переробляються, включаючи пластик.

4. Ініціативи приватного сектору

Ініціативи приватного сектору щодо зменшення використання пластику та покращення управління пластиковими відходами були менш поширеними та систематизованими порівняно з країнами Західної Європи та США. Але деякі компанії почали добровільно зменшувати використання мікропластику в своїх продуктах, особливо косметичні бренди почали прибирати мікропластик зі своїх продуктів під тиском громадськості та екологічних організацій, наприклад, у виробках, таких як скраби та зубні паста, де мікропластик використовувався як абразивний агент.

Деякі роздрібні мережі та супермаркети почали пропонувати альтернативи одноразовим пластиковим пакетам, такі як багаторазові сумки. Наприклад, супермаркети «Сільпо» та «АТБ» почали продавати багаторазові екологічні сумки, щоб зменшити використання одноразових пластикових пакетів. В деяких містах і супермаркетах були впроваджені програми зі збору та переробки пластикових відходів. Наприклад, мережа супермаркетів «Метро» встановлювала контейнери для збору використаних пластикових пляшок.

Незважаючи на те, що ці ініціативи були відносно обмеженими та мали фрагментарний характер, вони заклали основу для подальшого розвитку більш систематизованих заходів у наступні роки, коли проблема пластикового забруднення стала більш актуальною на глобальному рівні.

5. Регуляції в окремих країнах

Деякі країни, такі як США та країни Європейського Союзу, почали впроваджувати окремі регуляції щодо мікропластику. Наприклад, у 2015 році в США було прийнято «Microbead-Free Waters Act», який заборонив виробництво та продаж мікрогранул у косметичних продуктах. Також певні бізнеси та компанії брали участь у підтримці екологічних акцій та заходів, спрямованих на очищення територій від пластику. Наприклад, вони могли спонсорувати заходи з прибирання пляжів та парків. Ефективність регуляції щодо пластику варіюється залежно від країни та типу регулювання. Деякі країни, такі як Руанда, досягли значного успіху у зменшенні використання пластику завдяки

жорстким регулюванням та ефективним програмам моніторингу та виконання. Інші країни, наприклад США, де регулювання є більш м'якими, спостерігають повільніший прогрес.

Важливо зазначити, що регулювання щодо пластику є лише одним із інструментів, які можна використовувати для вирішення проблеми забруднення пластиком. Інші важливі аспекти включають підвищення обізнаності громадськості, освіти та заохочення стійких альтернатив пластику. Протягом 2000-х та 2010-х років регулювання щодо пластику стали важливим інструментом для боротьби з забрудненням пластиком. Хоча ефективність цих регуляцій варіюється, вони відіграють значну роль у стимулюванні змін та сприянні більш стійкому використанню пластику.

6. Міжнародні угоди і ініціативи

На міжнародному рівні також були прийняті угоди та ініціативи, спрямовані на зменшення пластикових відходів, включаючи мікропластик. Наприклад, ООН прийняла кілька резолюцій, які закликають до глобальних дій щодо зменшення пластикового забруднення.

У рамках Конвенція про біологічне різноманіття CBD, яка вступила в силу у 1993 році, було прийнято кілька рішень, спрямованих на збереження морського біорізноманіття, що включало заходи з боротьби із пластиковим забрудненням. У 2008 році конференція сторін CBD прийняла рішення про розробку стратегій зменшення впливу пластикового забруднення на морське біорізноманіття.

Хоча Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату (UNFCCC) конвенція більше фокусується на зміні клімату, багато країн почали інтегрувати питання управління відходами, включаючи пластикові відходи, у свої стратегії зменшення викидів парникових газів. Це включало заходи з покращення переробки та зменшення пластикових відходів.

У 2002 році країни-учасники Базельської конвенції прийняли рішення про включення пластикових відходів у свої програми. Це рішення зобов'язувало

країни покращити управління пластиковими відходами та зменшити їх транскордонне переміщення без належного контролю.

Програма ООН з навколишнього середовища UNEP відіграла важливу роль у підвищенні обізнаності щодо проблеми пластикового забруднення. У 2005 році UNEP запустила кампанію «Clean Up the World», яка включала заходи з прибирання пластику та інших відходів по всьому світу.

У 2006 році ІМО прийняла зміни до Міжнародної конвенції про запобігання забрудненню з суден (MARPOL), заборонивши скидання пластику з кораблів у море. Це було важливим кроком у зменшенні пластикового забруднення океанів.

У 2008 році UNEP опублікувала звіт «Marine Litter: A Global Challenge», який висвітлював масштаби та наслідки морського сміття, включаючи пластик, і закликав до міжнародних дій.

В рамках регіональних морських угод, таких як Барселонська конвенція для Середземного моря та Гельсінська конвенція для Балтійського моря, країни-учасники розробляли програми зменшення морського сміття, включаючи пластикові відходи.

Ці міжнародні угоди та ініціативи стали важливими кроками в глобальному контексті боротьби з пластиком забрудненням. Вони сприяли підвищенню обізнаності про проблему, розробці стратегій управління пластиковими відходами та стимулювали країни до впровадження національних заходів для зменшення пластикового забруднення.

Загалом, до впровадження конкретного законодавства щодо мікропластику, проблеми були регульовані переважно загальними екологічними законами та добровільними ініціативами. Зростаюча кількість наукових доказів і громадський тиск сприяли прискоренню прийняття спеціалізованого законодавства щодо управління відходами мікропластику.

Економічні механізми раціонального природокористування та охорони навколишнього середовища вважаються більш ефективними інструментами

управління, ніж адміністративні, правові та інші методи впливу на екологічний світогляд і поведінку людини. Структура регіонального економічного механізму управління у сфері поводження з побутовими відходами на регіональному рівні передбачає наявність цілеспрямованих дій, які впливають із загальних цілей системи управління, форм їх реалізації, важелів державного регулювання, інструментів реалізації, функції та відповідні заходи. Характерною рисою сучасної системи поводження з відходами в Україні загалом і твердими побутовими відходами зокрема є переважання адміністративних методів над економічними. Проте досвід країн ЄС показує, що лише економічні інструменти можуть створити важелі впливу на такі розсіяні забруднювачі, як побутові відходи, транспортні засоби, використана тара тощо. Одним із методів стимулювання використання відходів і вторинних ресурсів у промисловому виробництві та розвитку на ринку вторинних ресурсів можуть бути заходи стимулювання для підприємств, тобто зменшення податкового тиску, пільгові ставки або неоподаткування доходів, отриманих від використання відходів або вторинних ресурсів у процесі виробництва.

2.4 Особливості щодо процесу імплементації Закону України «Про управління відходами»

Передумови та значення поводження з відходами впливають з різних взаємопов'язаних факторів, таких як охорона навколишнього середовища. Оскільки неправильна утилізація відходів може призвести до забруднення землі, води та повітря. Поширені джерела забруднення пластиком включають неправильну утилізацію пластикових відходів, засмічення, невідповідну інфраструктуру переробки та мікропластик з поломка більших пластикових предметів. Забруднення пластиком має далекосяжні наслідки, включаючи заплутування та проковтування морськими тваринами, порушення роботи

екосистеми, забруднення джерел їжі та води та навіть викид шкідливих хімічних речовин у міру розкладання пластику.

Вирішення проблеми забруднення пластиком вимагає об'єднання зусиль, включаючи скорочення споживання пластику, вдосконалення практики поводження з відходами, сприяння переробці та повторному використанню, а також розвиток альтернативні матеріали, які менш шкідливі для навколишнього середовища.

Забруднення пластиком створює низку ризиків для навколишнього середовища та здоров'я. Він може заплутувати і душити морських тварин, потрапляти в організм диких тварин і вимивати шкідливі хімічні речовини в навколишнє середовище. Крім того, мікропластик був виявлений у питній воді, морепродуктах і навіть у повітрі, яким ми дихаємо, що викликає занепокоєння про потенційний вплив на здоров'я людини. Забруднення пластиком вважається глобальною екологічною кризою з кількох причин. Пластикові відходи повсюдно, зустрічаються в океанах, річках, лісах і навіть віддалених районах. Його широка присутність підкреслює широке охоплення людської діяльності та масштаби проблеми забруднення. Пластмаси надзвичайно міцні і можуть зберігатися в навколишньому середовищі від сотень до тисяч років. Це означає, що після того, як пластик потрапляє в навколишнє середовище, він залишається там протягом тривалого часу, створюючи постійну загрозу екосистемам і дикій природі. Морські тварини, птахи та наземні дикі тварини часто приймають пластикове сміття за їжу або заплутуються в ньому, що призводить до травм, задухи та смерті. Цей порушує екосистеми і може загрожувати цілим видам. З часом більші пластикові предмети розкладаються на менші фрагменти, відомі як мікропластик, які мають розмір менше 5 мм. Мікропластик легко поглинається широким спектром організмів, включаючи планктон, риб і птахів, і може накопичуватися та йти вгору по харчовому ланцюжку, потенційно досягаючи людей. Пластик може вимивати шкідливі хімічні речовини в навколишнє середовище, створюючи небезпеку як для дикої природи, так і для

здоров'я людини. Додатки, що використовуються в пластмасах, такі як бісфенол А (BPA) і фталати, пов'язані з різними проблемами зі здоров'ям, включаючи репродуктивні проблеми та порушення розвитку.

Закон України № 2320-IX «Про управління відходами» прийнятий 20 червня 2022 року спрямований на гармонізацію законодавства України з європейським законодавством у сфері управління відходами, зокрема, на виконання зобов'язань за Угодою про асоціацію між Україною та ЄС. Закон покликаний забезпечити більш сучасний та комплексний підхід до управління відходами. Основні положення:

- Визначення розширеної відповідальності виробника (РВВ).
- Запровадження європейської ієрархії поводження з відходами: запобігання утворенню відходів, підготовка до повторного використання, переробка, інші методи утилізації, зокрема енергетична утилізація, видалення.
- Впровадження принципу циркулярної економіки, спрямованої на максимальне використання ресурсів та мінімізацію відходів.
- Зобов'язання щодо роздільного збирання відходів.
- Створення умов для залучення приватних інвестицій у сферу управління відходами.
- Встановлення чітких правил для роботи з небезпечними відходами.
- Підвищення прозорості та звітності у сфері управління відходами.

Основні відмінності Закону України від 20 червня 2022 року №2320-IX «Про управління відходами» та Закону України від 5 березня 1998 року №187/98-ВР «Про відходи» представлені в таблиці 2.3.

Ці зміни покликані поліпшити систему управління відходами в Україні, зробити її більш ефективною, екологічно чистою та відповідною сучасним стандартам.

Таблиця 2.3

**Основні відмінності Закону України від 20 червня 2022 року №2320-IX
«Про управління відходами» та Закону України від 5 березня 1998 року
№187/98-ВР «Про відходи».**

Критерій	Закону України від 20 червня 2022 року №2320-IX «Про управління відходами»	Закону України від 5 березня 1998 року №187/98-ВР «Про відходи»
1	2	3
Орієнтація на європейські стандарти	Закон «Про управління відходами» орієнтується на європейське законодавство і впроваджує принципи циркулярної економіки та РВВ. Спрямований на впровадження принципів циркулярної економіки та гармонізацію з Директивою ЄС щодо відходів. Він передбачає поетапний перехід до європейських стандартів у сфері поводження з відходами.	Закон «Про відходи» більше фокусується на базових аспектах поводження з відходами. Був розроблений у період становлення української державності і не містив чітких посилань на європейські директиви та стандарти.

Продовження таблиці 2.3

1	2	3
Ієрархія поводження з відходами	Новий закон вводить чітку ієрархію поводження з відходами, що відповідає стандартам ЄС: профілактика утворення відходів, підготовка до	Містив загальні положення щодо ієрархії, але не визначав чітких пріоритетів.

	повторного використання, переробка, утилізація та захоронення. Це сприяє мінімізації негативного впливу відходів на довкілля.	
Розширена відповідальність виробника	Закон «Про управління відходами» запроваджує цей принцип, що зобов'язує виробників відповідати за весь життєвий цикл своїх продуктів, включаючи їх утилізацію. Це стимулює виробників розробляти більш екологічні продукти та упаковки.	Не передбачав чіткого механізму розширеної відповідальності виробників (РВВ).
Сучасні підходи та технології	Новий закон включає положення про залучення новітніх технологій та підходів до управління відходами, надаючи більше можливостей для розвитку інфраструктури поводження з відходами	Був розроблений у період, коли технології управління відходами були менш розвиненими.

Продовження таблиці 2.3

1	2	3
Звітність та прозорість	Закон «Про управління відходами» встановлює більш чіткі вимоги до звітності та прозорості в діяльності суб'єктів господарювання у цій сфері. Це	Не містив детальних вимог щодо звітності та прозорості.

	підвищує рівень прозорості та контролю за дотриманням законодавства.	
--	--	--

Основні плюси Закону України № 2320-IX «Про управління відходами»:

1. Впровадження ієрархії управління відходами:

Цей закон вперше в українському законодавстві чітко визначає ієрархію управління відходами, яка ґрунтується на принципі запобігання утворенню відходів на стадії проектування, виробництва, споживання та поводження з продукцією, а потім на максимізації їх повторного використання, рециклінгу та інших операцій з відновлення. Це означає, що пріоритетом має бути зменшення кількості відходів, які утворюються, а не просто їх утилізація

Запобігання утворенню відходів. Це означає, що пріоритетом має бути зменшення кількості відходів, які утворюються, на стадії проектування, виробництва, споживання та поводження з продукцією. Це може бути досягнуто за допомогою таких заходів, як:

- Розробка екологічно чистих продуктів та упаковки.
- Використання багаторазових товарів.
- Зменшення використання одноразових товарів.
- Ремонт та відновлення продукції.
- Перехід до більш екологічних технологій виробництва.

Повторне використання. Це передбачає повторне використання продуктів або їх компонентів без певної обробки. Це може бути досягнуто за допомогою таких заходів, як:

- Повернення та повторне використання упаковки.
- Ремонт та відновлення продукції.
- Створення ринків для продукції з перероблених матеріалів.

Рециклінг. Це передбачає переробку відходів на нові продукти або матеріали. Це може бути досягнуто за допомогою таких заходів, як:

- Сортування відходів.
- Переробка пластику, паперу, скла, металів та інших матеріалів.
- Компостування органічних відходів.

Інші операції з відновлення. Це включає спалювання відходів з енергогенеруючою метою, а також використання відходів як сировини для виробництва інших продуктів.

Утилізація. Це останній етап ієрархії, який використовується лише для тих відходів, створення яких ми не можемо запобігнути, повторно використані, рециклізовані або обробити іншим способом.

2. Планування системи управління відходами

Закон зобов'язує органи державної влади та місцевого самоврядування розробляти плани управління відходами на національному, регіональному та місцевому рівнях. Ці плани мають ґрунтуватися на принципах ієрархії управління відходами та враховувати особливості регіону.

Плани управління відходами повинні містити наступну інформацію:

- Аналіз поточного стану управління відходами в регіоні.
- Цілі та завдання з управління відходами.
- Заходи, які будуть вжиті для досягнення цих цілей.
- Терміни виконання заходів.
- Джерела фінансування заходів.
- Механізми моніторингу та оцінки ефективності заходів.

3. Запровадження системи розширеної відповідальності виробника

Закон запроваджує систему розширеної відповідальності виробника (РВВ), яка покладає на виробників фінансову відповідальність за управління відходами їх продукції. Це має стимулювати виробників до розробки більш екологічних продуктів та упаковки, а також до покращення системи збирання та переробки відходів. Це означає, що виробники повинні:

- Фінансувати збирання, переробку та утилізацію своїх відходів.
- Розробляти та впроваджувати програми зменшення утворення відходів.

- Інформувати споживачів про те, як правильно поводитися з їхніми продуктами.

PBB має стимулювати виробників до розробки більш екологічних продуктів та упаковки, а також до покращення системи збирання та переробки відходів.

4. Створення сучасної інфраструктури та об'єктів збирання і оброблення відходів

Закон передбачає створення сучасної інфраструктури та об'єктів збирання і оброблення відходів, що відповідають найкращим європейським практикам. Це має покращити ефективність управління відходами та зменшити їх негативний вплив на навколишнє середовище. Також закон передбачає будівництво нових та модернізацію існуючих об'єктів збирання, сортування, переробки та утилізації відходів. Це допоможе:

- Збільшити обсяги переробки відходів та зменшити обсяги захоронення.
- Покращити якість поводження з відходами та зменшити їх негативний вплив на довкілля.
- Створити нові робочі місця в сфері поводження з відходами.

5. Посилення контролю за сферою поводження з відходами

Закон посилює контроль за сферою поводження з відходами, в тому числі за діяльністю суб'єктів господарювання, які здійснюють поводження з відходами. Це має допомогти зменшити кількість незаконних звалищ та інших порушень у цій сфері. Це допоможе:

- Зменшити кількість несанкціонованих звалищ.
- Покращити дотримання екологічних норм.
- Підвищити відповідальність суб'єктів господарювання за поводження з відходами.

6. Підвищення обізнаності громадськості

Закон передбачає заходи щодо підвищення обізнаності громадськості про проблеми управління відходами та важливість їх вирішення. Це має сприяти

залученню громадян до процесу прийняття рішень у цій сфері та до відповідального споживання. Закон зобов'язує органи державної влади та місцевого самоврядування проводити інформаційно-просвітницькі кампанії з питань поводження з відходами. Це може включати:

- Розповсюдження інформаційних матеріалів про проблему відходів, їх негативний вплив на довкілля та здоров'я людей, а також про важливість правильного поводження з ними.
- Проведення заходів з екологічної освіти та виховання в навчальних закладах.
- Залучення до інформаційно-просвітницької роботи громадських організацій та ЗМІ.

Важливо зазначити, що Закон України № 2320-IX «Про управління відходами» є лише першим кроком на шляху до вирішення проблеми забруднення пластиком в Україні. Для того, щоб досягти значних результатів, необхідно буде докласти значних зусиль з боку держави, бізнесу та громадянського суспільства.

7. Посилення контролю за небезпечними відходами.

Закон посилює контроль за небезпечними відходами, щоб запобігти їх негативному впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей. Це включає:

- Більш жорсткі вимоги до зберігання, транспортування та обробки небезпечних відходів.
- Збільшення штрафів за порушення правил поводження з небезпечними відходами.
- Створення електронної системи обліку та контролю за рухом небезпечних відходів.

Висновки до розділу

Наразі не існує конкретного законодавства в Україні, що б присвячувалося виключно питанням пластику та мікропластика. Однак, було кілька законодавчих ініціатив та стандартів, які вказують на зростаючу увагу до цих проблем:

- 1) Стратегія управління відходами в Україні
- 2) Закон України «Про охорону атмосферного повітря»
- 3) Стандарти щодо безпеки продукції
- 4) Національний план дій з питань раціонального використання та управління хімічними речовинами в Україні до 2025 року

Також в українському законодавстві є й інші нормативно-правові акти такі як, закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», технічний регламент щодо обмеження використання деяких видів одноразового пластикового посуду та інших виробів з пластику до проекту Закону України «Про обмеження виробництва та обігу пластикової продукції одноразового використання на території України» який було знято з розгляду 05.09.2023 року.

Імплементація українського законодавства щодо пластику та мікропластика здійснюється шляхом розробки та впровадження нормативно-правових актів, які конкретизують положення основного законодавства, створення системи контролю за дотриманням законодавства щодо пластику та мікропластика, проведення інформаційно-просвітницьких заходів щодо проблем забруднення пластиком та мікропластиком. деякі аспекти та можливі заходи, які можуть бути впроваджені для реалізації законодавчих заходів щодо боротьби з мікропластиком:

- 1) Розробка та впровадження ефективних систем збору та сортування відходів.
- 2) Заохочення використання альтернативних матеріалів, які не містять мікропластику.

- 3) Просвітницька робота серед населення про негативний вплив мікропластика на довкілля та здоров'я людини.
- 4) Заборона або обмеження одноразового пластику.
- 5) Стимулювання переробки.
- 6) Обмеження використання мікропластику. Встановлення норм та стандартів, що обмежують використання мікропластику в косметичних та чистячих засобах та інших товарах.
- 7) Інші

Закон України № 2320-IX «Про управління відходами» є значним кроком вперед у справі покращення системи управління відходами в Україні. Цей Закон має допомогти:

- Зменшити кількість відходів, які утворюються
- Збільшити обсяг відходів, які переробляються
- Зменшити негативний вплив відходів на навколишнє середовище та здоров'я людей
- Створити нові робочі місця в сфері управління відходами
- Стимулювати розвиток зеленої економіки

Важливо, щоб усі зацікавлені сторони, включаючи органи державної влади, місцевого самоврядування, підприємства та громадян, співпрацювали для успішної реалізації цього Закону.

РОЗДІЛ III. СПОСОБИ ВИЯВЛЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ В КОМПОНЕНТАХ ДОВКІЛЛЯ. ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГІДРОЕКОСИСТЕМ ТА ІНШИХ КОМПОНЕНТІВ ДОВКІЛЛЯ ВІД МІКРОПЛАСТИКУ

3.1. μ -FT-IR (Фур'є-спектроскопія) мікроскопія та Раман-спектроскопія

Хоча світлова мікроскопія є основним методом виявлення мікропластику, цей підхід не надає хімічної інформації, необхідної для ідентифікації полімерів.

Однак ця ідентифікація життєво важлива для дослідження впливу та походження знайденого мікропластику. Саме тому експерти з мікропластику звертаються до μ -FT-IR зображень у поєднанні з інструментами оцінки машинного навчання. В результаті можлива повна характеристика частинок, виключена людська помилка та отримані надійні відтворювані результати.

В інфрачервоній спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR) хімічний аналіз зазвичай починається з рідкого зразка, який був підготовлений по-різному залежно від його походження. Цей зразок фільтрується на прозору для ІЧ-прозорості підкладку та повністю вимірюється за допомогою FT-IR-зображення для захоплення всіх частинок, присутніх на фільтрі. Потім хімічне зображення автоматично аналізується за допомогою надійного алгоритму машинного навчання [48].

FT-IR мікроскопія є найпоширенішим підходом у дослідженні мікропластику. Робочий процес надзвичайно простий, а результати забезпечують високу точність і, головне, надійність. Зокрема, FT-IR зображення за допомогою детекторів фокальної матриці є найсучаснішим рішенням. Чому ж FT-IR зображення для аналізу мікропластику варто використовувати? Сильні сторони FT-IR візуалізації полягають в тому, що інфрачервоне (ІЧ) випромінювання взаємодіє з частинками мікропластику, створюючи характерні моделі поглинання ІЧ-променів. Потім ці шаблони використовуються для ідентифікації частинок. Також перевагою FT-IR є його виняткова надійність і легкість застосування. Будь-які пластикові частинки (темного кольору, наповнені, флуоресцентні тощо) можна аналізувати, вимагаючи від користувача мінімальних зусиль [48].

Справжні детектори зображення розкривають потенціал FT-IR. Але коли ви поєднуєте FT-IR з детектором фокальної матриці (FPA), все стає справді цікавим. Результатом є дуже потужний інструмент візуалізації, здатний спростити аналіз мікропластику до звичайного рівня. Це зводиться до повністю автоматизованого підходу, який може витримувати значне забруднення на

фільтрі (наприклад, від осаду) без жодного негативного впливу на результати вимірювань. Зрештою, FT-IR зображення гарантує, що жодна частинка не залишиться непоміченою, забезпечуючи максимальну надійність і швидкість вимірювання [48].

Секрет мікропластику полягає в правильному поєднанні апаратного та програмного забезпечення. Окрім аналітичного методу, програмне забезпечення має вирішальне значення для аналізу мікропластику. Традиційно спектральні довідкові бібліотеки мікропластику забезпечують статистичний аналіз розміру, кількості та ідентичності. Але є обмеження того, що такі бібліотеки можуть запропонувати. Якщо вам потрібен дуже надійний і надійний аналіз, ви повинні значно збільшити кількість спектрів у бібліотеці, що значно сповільнює аналіз.

Але для того, щоб зробити аналіз мікропластику масштабованим і рутинним, аналіз даних повинен стати швидшим і, перш за все, інтелектуальнішим. Використовувати величезні бібліотеки просто непрактично, коли час має вирішальне значення [48].

Мас-спектрометрія циклотронного резонансу з іонним перетворенням Фур'є (FTICR) — різновид мас-аналізатора (або мас-спектрометра) для визначення відношення маси до заряду (m/z) іонів на основі циклотронної частоти іонів у фіксованому магнітному полі. [49] Іони затримуються в пастці Пеннінга (магнітне поле з електричними ловчими пластинами), де вони збуджуються (на резонансних циклотронних частотах) до більшого радіусу циклотрона коливальним електричним полем, ортогональним до магнітного поля. Після зняття поля збудження іони обертаються зі своєю циклотронною частотою по фазі (у вигляді «пакета» іонів). Ці іони індукують заряд (реєструється як струм зображення) на парі електродів, коли пакети іонів проходять близько до них. Результуючий сигнал називається вільним індукційним розпадом (FID), перехідним процесом або інтерферограмою, яка

складається з суперпозиції синусоїдальних хвиль. Корисний сигнал витягується з цих даних шляхом виконання перетворення Фур'є для отримання мас-спектра.

Фізика FTICR схожа на фізику циклотрона, принаймні в першому наближенні.

У найпростішому ідеалізованому вигляді залежність між частотою циклотрона і відношенням маси до заряду задається формулою:

$$f = \frac{qB}{2\pi m}, \quad (2.1)$$

де f = частота циклотрона, q = заряд іона, B = напруженість магнітного поля, m = маса іона.

Це частіше представлено в кутовій частоті:

$$\omega_c = \frac{qB}{m}, \quad (2.2)$$

де ω_c – це кутова частота циклотрона, яка за визначенням пов'язана з частотою

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (2.3)$$

Через квадрупольне електричне поле, яке використовується для захоплення іонів в осьовому напрямку, це співвідношення є лише приблизним. Осьове електричне захоплення призводить до осьових коливань всередині пастки з (кутовою) частотою

$$\omega_t = \sqrt{\frac{q\alpha}{m}}, \quad (2.4)$$

де α є константою, подібною до постійної пружини гармонічного генератора і залежить від прикладеної напруги, розмірів пастки та геометрії пастки.

Електричне поле і результуючий осьовий гармонічний рух зменшують частоту циклотрона і вводять другий радіальний рух, званий магнетронним рухом, який відбувається на частоті магнетрона. Рух циклотрона все ще є

частотою, що використовується, але наведене вище співвідношення не є точним через це явище. Власні кутові частоти руху дорівнюють

$$\omega_{\pm} = \frac{\omega_c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_c}{2}\right)^2 - \frac{\omega_t^2}{2}}, \quad (2.4)$$

де ω_t — це осьова частота захоплення, обумовлена осьовим електричним захопленням і ω_+ - це знижена циклотронна (кутова) частота і ω_- магнетронна (кутова) частота. Знов ω_+ це те, що зазвичай вимірюється у FTICR. Сенс цього рівняння можна зрозуміти якісно, розглянувши випадок, коли ω_t є невеликим, що в цілому вірно. У цьому випадку значення радикала лише трохи менше, ніж $\omega_c/2$, а значення ω_+ лише трохи менше, ніж ω_c (частота циклотрона дещо знижена). Для ω_- Величина радикала однакова (трохи менше ніж $\omega_c/2$, але він віднімається від $\omega_c/2$, в результаті чого виходить мале число, що дорівнює $\omega_c - \omega_+$ (тобто величину, на яку зменшилася частота циклотрона).

FTICR-MS істотно відрізняється від інших методів мас-спектрометрії тим, що іони не виявляються при попаданні на детектор, наприклад, на електронний помножувач, а тільки шляхом проходження поблизу пластин детектування. Крім того, маси не визначаються в просторі або часі, як в інших методах, а лише за допомогою частоти іонного циклотронного резонансу (обертання), яку кожен іон виробляє при обертанні в магнітному полі. Таким чином, різні іони не реєструються в різних місцях, як у секторних приладах, або в різний час, як у приладів з часом польоту, а всі іони виявляються одночасно під час інтервалу детектування. Це забезпечує збільшення спостережуваного співвідношення сигнал/шум завдяки принципам переваги Феллгетта. [49] У FTICR-MS, роздільна здатність може бути поліпшена або за рахунок збільшення сили магніту (в тесла), або за рахунок збільшення тривалості виявлення. [50]

Раманівська спектроскопія — це спектроскопічний метод, який зазвичай використовується для визначення коливальних режимів молекул, хоча також можна спостерігати обертальні та інші низькочастотні режими систем [51].

Раманівська спектроскопія зазвичай використовується в хімії для отримання структурного відбитка, за яким можна ідентифікувати молекули.

Суть методу полягає в тому, що через зразок досліджуваної речовини пропускають промінь із певною довжиною хвилі, який при контакті зі зразком розсіюється. Отримані промені за допомогою лінзи збираються в один пучок і пропускаються через світлофільтр, що відділяє слабкі (0,001 % інтенсивності) раманівські промені від значно інтенсивніших (99,999 %) релеївських. «Чисті» раманівські промені підсилюються і спрямовуються на детектор, який фіксує частоту їхнього коливання.

Раман-спектрометр складається з чотирьох основних компонентів:

- джерело монохроматичного випромінювання (лазера);
- система освітлення зразка і фокусування променів;
- світлофільтр;
- системи виявлення та комп'ютерного контролю;

Переважно як джерело збуджуючого світла використовують такі лазери, як Ar⁺ (351,1-514,5 нм), Kr⁺ (337,4-676,4 нм) і He-Ne (632,8 нм). В останні роки впроваджуються також пульсуючі лазери Nd:YAG, діоди та ексімерні лазери для УФ резонансної раман-спектроскопії. З часу появи спектроскопії до відкриття лазера (1960-ті роки) єдиним джерелом збудження були ртутні лампи із додатковим світлофільтром. Для того, щоб досягнути необхідної потужності до комплексу таких ламп входили спеціальні підсилювачі.

Лазерний промінь, зважаючи на його малий діаметр (~1мм), нескладно сфокусувати на зразку. Розсіяні промені спрямовують на світлофільтр частіше за допомогою системи збірних і фокусуючих лінз (рис.3.1), хоча також застосовують систему дзеркал (рис.3.2). Система ахроматичних лінз може мати дві конфігурації, залежно від того, чи фіксуються промені, що розсіюються під кутом 90° (а), чи під кутом 180° (б).

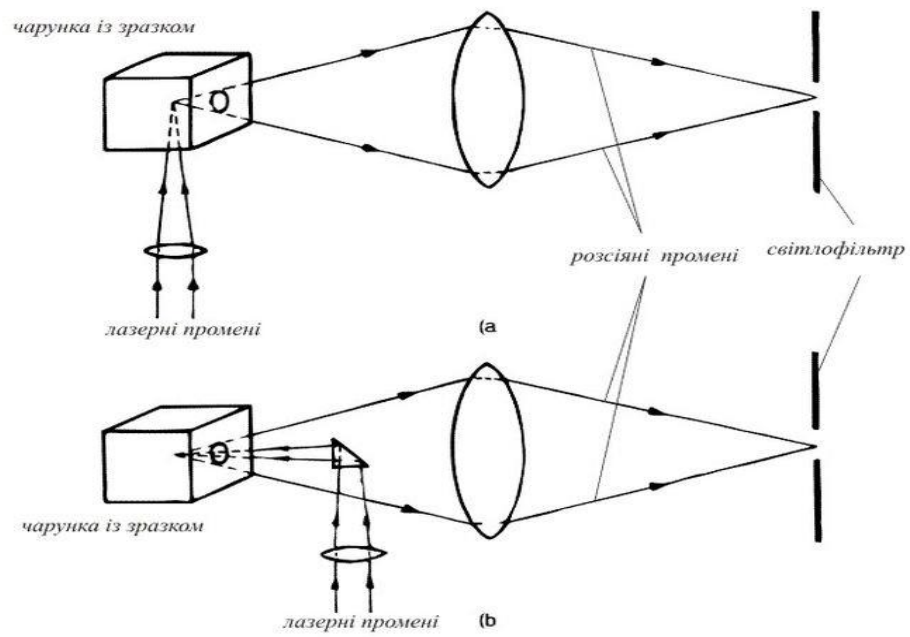


Рис. 3.1 Система лінз

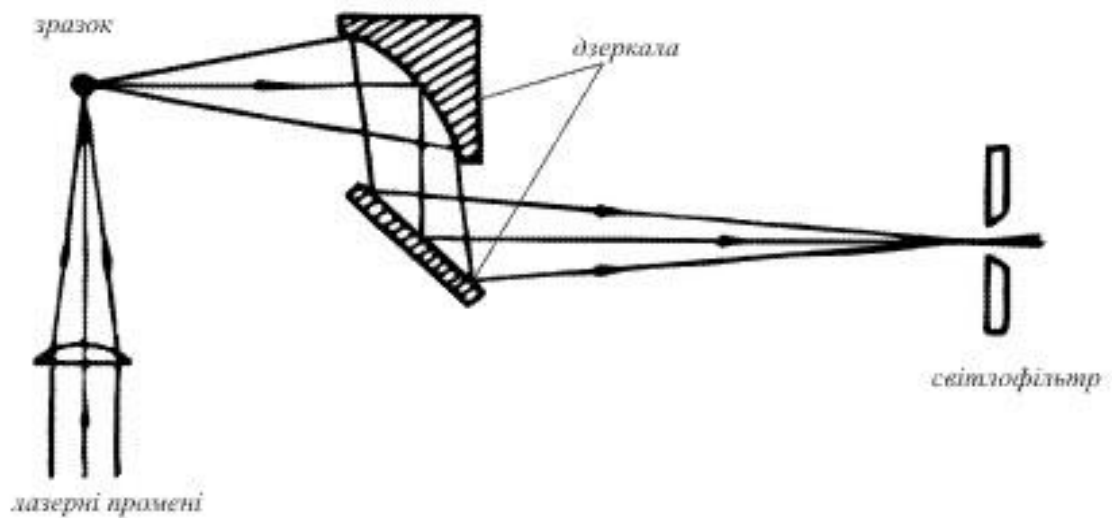


Рис. 3.2 Система дзеркал

Як правило використовуються інтерференційні фільтри, в яких дві оптичні площини здатні пропускати лише промені з довжинами хвиль, що кратні до подвоєної товщини фільтра. Нещодавно почали застосовуватися і акустичні фільтри.

У зв'язку з малою інтенсивністю раманівського сигналу, до детекторів ставляться серйозні вимоги, а тому фотографічні плівки поступилися місцем високочутливим фотодетекторам.

Ефект Рамана заснований на взаємодії між електронною хмарою зразка і зовнішнім електричним полем монохроматичного світла, яке може створювати індукований дипольний момент всередині молекули на основі її поляризуючої здатності. Оскільки лазерне світло не збуджує молекулу, не може бути реального переходу між енергетичними рівнями. [52] Ефект Рамана не слід плутати з випромінюванням (флуоресценцією або фосфоресценцією), коли молекула в збудженому електронному стані випромінює фотон і повертається в основний електронний стан, у багатьох випадках у вібробуджений стан на поверхні потенційної енергії приземного електронного стану. Комбінаційне розсіювання також контрастує з інфрачервоним (ІЧ) поглинанням, де енергія поглиненого фотона відповідає різниці в енергії між початковим і кінцевим рівібронічними станами. Залежність комбінаційного розсіювання світла від похідної електричної дипольної поляризації також відрізняється від ІЧ-спектроскопії, яка залежить від похідної електричного дипольного моменту — атомного полярного тензора (АЧТ). Ця контрастна особливість дозволяє аналізувати рівібронічні переходи, які можуть бути неактивними в ІЧ-діапазоні, за допомогою раманівської спектроскопії, що ілюструє правило взаємного виключення в центросиметричних молекулах. Переходи, які мають велику комбінаційну інтенсивність, часто мають слабку інтенсивність ІЧ і навпаки. Якщо зв'язок сильно поляризований, невелика зміна його довжини, подібна до тієї, що відбувається під час вібрації, має лише незначний результуючий вплив на поляризацію. Таким чином, коливання за участю полярних зв'язків (наприклад, С-О, N-О, О-Н) є порівняно слабкими розсіювачами комбінаційного розсіювання. Такі поляризовані зв'язки, однак, несуть свої електричні заряди під час вібраційного руху (якщо вони не нейтралізуються факторами симетрії), і це призводить до більшої зміни

сумарного дипольного моменту під час вібрації, створюючи сильну ІЧ-смугу поглинання. І навпаки, відносно нейтральні зв'язки (наприклад, C-C, C-H, C=C) зазнають значних змін поляризації під час коливання. Однак дипольний момент не піддається аналогічному впливу, так що в той час як коливання, що включають переважно цей тип зв'язку, є сильними комбінаційними розсіювачами, в ІЧ вони слабкі. Третій метод вібраційної спектроскопії, непружне некогерентне розсіювання нейтронів (IINS), може бути використаний для визначення частот коливань у високосиметричних молекулах, які можуть бути як ІЧ, так і комбінаційним розсіюванням. Правила відбору IINS, або дозволені переходи, відрізняються від правил IR і Raman, тому ці три техніки доповнюють одна одну. Всі вони дають однакову частоту для даного вібраційного переходу, але відносні інтенсивності дають різну інформацію через різні типи взаємодії між молекулою і вхідними частинками, фотонів для ІЧ і Рамана і нейтронів для IINS.

Комбінаційне розсіювання зазвичай реєструється в [хвильових числах](#), які мають одиниці оберненої довжини, оскільки ця величина безпосередньо пов'язана з енергією. Для перетворення між спектральною довжиною хвилі і числами хвиль зсуву в спектрі комбінаційного розсіювання світла може бути використана наступна формула:

$$\Delta\tilde{\nu} = \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_1} \right), \quad (3.1)$$

де $\Delta\tilde{\nu}$ — комбінаційний зсув, виражений у хвильовому числі, λ_0 — довжина хвилі збудження, а λ_1 — довжина хвилі комбінаційного розсіювання. Найчастіше одиницею вимірювання хвильового числа в комбінаційному розсіюванні світла є обернені сантиметри (cm^{-1}). Оскільки довжина хвилі часто виражається в одиницях нанометрів (нм), наведена вище формула може масштабуватися для цього перетворення одиниць явно, даючи

$$\widetilde{\Delta\nu}(\text{cm}^{-1}) = \left(\frac{1}{\lambda_0(\text{nm})} - \frac{1}{\lambda_1(\text{nm})} \right) \cdot \frac{(10^7 \text{nm})}{(\text{cm})}. \quad (3.2)$$

3.2. Виявлення та кількісне визначення забруднення людської крові та фекалій пластиковими частинками

Частинки пластику є повсюдним забруднювачем середовища проживання та харчового ланцюга, але на сьогоднішній день жодне дослідження не повідомляє про внутрішній вплив частинок пластику на кров людини.

Вимірювання токсичних хімікатів у тканинах людини має неоціненне значення для підтвердження рівня впливу та стимулювання заходів із захисту громадського здоров'я. Оцінка ризику для здоров'я людини (HRA) щодо забруднення пластиковими частинками наразі неможлива через відсутність даних як про токсикологічну небезпеку, так і про вплив на людину. Вимірювання впливу пластикових частинок має важливе значення для HRA, але підтверджених методів, достатньо чутливих для виявлення слідових кількостей особливо малих (<10 мкм) фракцій пластикових частинок у біологічних тканинах, бракує.

Аналітичні дослідження в усьому світі створили великий набір даних про присутність пластикових частинок у різних матрицях, включаючи, наприклад, біоту (або вміст кишечника) вода, осад та продукти харчування. Людські фекалії раніше аналізували за допомогою інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR), що довело, що частинки пластику мікророзміру можуть виводитися через шлунково-кишковий тракт [53-54]. Частинки пластику також були виявлені в зразках, отриманих після колектомії людини за допомогою FTIR (Ibrahim et al., 2020). Раманівська мікроспектроскопія нещодавно була застосована для зображення та ідентифікації трьох поліпропіленових частинок розміром від 5 до 10 мкм у плацентарній тканині людини [55].

Кров як компартмент становить 6-7% маси тіла людини. Він зрошує органи тіла та є транспортним шляхом для кисню, поживних речовин і, можливо, також пластикових частинок навколо тіла до інших тканин і органів. Остаточна доля частинок пластику залежить від того, чи можна їх усунути, наприклад, нирковою фільтрацією чи виділенням з жовчю, чи осісти в печінці, селезінці чи в інших органах через фенестровані капіляри та синусоїди. Розмір, форма, хімічний склад поверхні та заряд частинки визначають її взаємодію з біологічними системами, включаючи утворення білкової корони на поверхні частинки [56]. Роль крові як транспортного шляху в поєднанні з можливістю доступу до зразків безпосередньо з тіла, без контакту з пластиковими матеріалами, робить її відповідною матрицею для біомоніторингу пластикових частинок людини та для цього дослідження.

Ступінь змішування в кровотоці в цілому вважається високим у здорових людей, при цьому забруднення навколишнього середовища розподіляються по різних фазах (водній, ліпідній, білковій) по всій системі кровообігу. Рівень мікрозабруднення навколишнього середовища, виміряний у зразках венозної крові, вважається індикативним для всього кровотоку, включаючи мікросудинну систему. Враховуючи, що капіляри зазвичай мають діаметр лише 5–8 мкм, це обмежує розміри частинок, які можна очікувати в циркуляції в цих мікросудинах, і будь-які присутні частки, ймовірно, впливатимуть на динаміку мікросудинної рідини. У добре змішаному кровотоці або в підзразках добре змішаного зразка крові існує багато відкритих питань щодо того, як можуть розподілятися пластикові частинки різних розмірів. Деякі, ймовірно, локалізуються в імунних клітинах, тоді як інші можуть бути прикріплені до білків, ліпідних частинок, інших пластикових частинок або ендотелію судин. Хоча масові концентрації в даному зразку можуть бути виявлені, частинки можуть бути агломерованими, або кількість самих частинок може бути присутньою в розбавлених концентраціях у матриці. Це дає можливість спостерігати невиявлені та виявлені в дублікатних зразках, особливо для малих

об'ємів споживання зразків. Однак існують як етичні, так і практичні причини для малих об'ємів зразків крові, або кількість самих частинок може бути присутньою в розбавлених концентраціях у матриці. Це дає можливість спостерігати невиявлені та виявлені в дублікатних зразках, особливо для малих об'ємів споживання зразків. Однак існують як етичні, так і практичні причини для малих об'ємів зразків крові. або кількість самих частинок може бути присутньою в розбавлених концентраціях у матриці.

В дослідницькій роботі зразки крові відбирали та вимірювали в двох примірниках, у послідовних серіях, з кількома процедурними холостими пробами в кожній серії для контролю фонового забруднення та корекції вимірюваних даних концентрації в крові для середнього процедурного холостого зразка. Щоб зменшити кількість продуктів деполімеризації PET на етапі аналізу, використовували реагент, який призводить до утворення домінуючого продукту, диметилтерефталату (DMT). Аналіз проводили за допомогою багатозарядної піролізної установки EGA/PY-3030D (Frontier Laboratories, Сайкон, Японія) в режимі «подвійного пострілу».

Сполуки, які десорбуються в першому циклі («постріл»), являють собою молекули, які випаровуються між 100 і 300 °C і можуть включати неполімеризовані мономери, добавки та інші сорбовані хімікати. Полімеризовані цільові аналіти, такі як полістирол, EPS, ABS, PP, PE, PMMA фізично не можуть випаруватися під час «першого удару», оскільки максимальна температура 300 °C є занадто низькою (тому вони зберігаються для другого удару). Будь-які мономери (наприклад, стирол), потенційно присутні під час «першої спроби», не використовувалися для визначення концентрації частинок пластику, за винятком PET, де дериватизований продукт вже утворюється при 300 °C, і результати як першої, так і другої спроб були об'єднані. Хроматограми другого «пострілу» піролізу використовувалися для визначення концентрацій інших полімерів, пов'язаних із частинками.

Кількісне визначення продуктів піролізу проводили за допомогою калібрувальної кривої, що містить усі типи цільових полімерів у відомих концентраціях. П'ять стандартів цільового полімеру зважували (3 мг кожен) і переносили в 22-мл прискорену екстракцію розчинником з нержавіючої сталі (ASE), що містить 23 г морського піску (який був попередньо нагрітий при 600 °C у муфельній печі, продутий азотом протягом 1 години для видалення залишків пластику) для диспергування та допомоги в процесі ASE. Полімери розчиняли в дихлорметані (DCM) в ASE (Thermo Scientific™ ASETM 350 Accelerator Solvent Extractor 083146, Waltham, MA, USA) при 180 °C, під тиском 1500 фунтів на кв. З отриманого розчину п'ять різних об'ємів додавали до чашок піролізерів і вимірювали для отримання калібрувальної кривої (лінійної відповідності) для 5 присутніх полімерних стандартів.

Щоб визначити відновлення полімерів у крові за допомогою цього методу, було проведено експеримент із підживленням. Чутливість і ефективність методу було продемонстровано за допомогою експерименту з відновлення та контролю фонового забруднення під час відбору проб і аналітичних процедур. Фонове забруднення у восьми холостих пробах MilliQ® в експерименті відновлення наведено в таблиці 3.1. Кров, використана для експерименту з відновлення, містила дуже низькі, але все ж трохи підвищені рівні PE і PS порівняно з холостими пробами; жодних інших аналітів не виявлено в крові без додавання.

У 18 донорів, для яких було проведено повторний аналіз, дублікати зразків рідко демонстрували як невиявлення (значення <LOD), так і значення >LOQ: з усіх дублікатів вимірювань не повідомлялося про випадки цього для PP або PMMA, по одному корпусу для PS і PE і три корпусу для PET. Через те, що зразки мали низькі концентрації аналіту близько LOD, частіше виявляли, що одне дублікатне вимірювання не було виявлено, а інше – між LOD і LOQ: один випадок для PMMA, чотири випадки для PP і PS, сім футлярів для PE та шість корпусів для PET (рис.3.3). На відміну від розчинених і сорбованих

мікромолекул, які пасивно дифундують і розподіляються між фазами в матриці, ці цільові аналіти присутні у формі частинок і можуть мати дуже різні маси частинок або утворювати агрегати. Неоднорідність зразків може пояснити деякі відмінності в повторюваних вимірюваннях, хоча аналітична чутливість, ймовірно, відіграє певну роль. Багато вимірювань були близькі до LOQ, а повторні вимірювання часто були як трохи вище, так і трохи нижче LOQ у того самого донора.

Це перше дослідження такого роду, у якому використовувався Py-GC/MS для аналізу пластикових частинок цільної крові людини, дуже складної матриці.

Таблиця 3.1

Кількості полімерів (нг абсолютного) для процедурного холостого зразка з водою MilliQ® аналітичного класу, для крові без додавання та для крові з низьким вмістом додавання. sd стандартне відхилення; CV, коефіцієнт варіації; LOD, межа виявлення

Аналіт (і мономер для кількісного визначення)	MilliQ® холосте середнє (sd) (нг)	РЕЗЮМЕ (%)	Середнє значення крові без домішок* (sd) (нг)	РЕЗЮМЕ (%)	Середнє значення низького спайку ** (sd) (нг)	РЕЗЮМЕ (%)
1	2	3	4	5	6	7
ПММА (метилметакрилат)	5,2 (3,6)	70	4,5 (1,6)	35	16 (3,7)	22
РР (2,4-диметил-1-гептен)	43 (3,7)	9	54 (16)	29	43 (11)	25

ПС (стирол)	40 (9,1)	23	111 (18)	16	33 (20)	59
ПС (тример стиролу)	8,3 (2,8)	33	<LOD	<L OD	24 (8,6)	36

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
РЕ (1-децен)	72 (29)	40	150 (30)	20	120 (104)	87
РЕ (1- ундецен)	65 (25)	38	206 (52)	25	151 (101)	67
РЕТ (диметилтере фталат)	8,8 (2,7)	31	14 (11)	76	33 (27)	83

*дані крові без вкраплень, наведені тут як не виправлені для процедурного бланка; **з поправкою на невнесену кров, яка не виправлена на бланк MilliQ®.

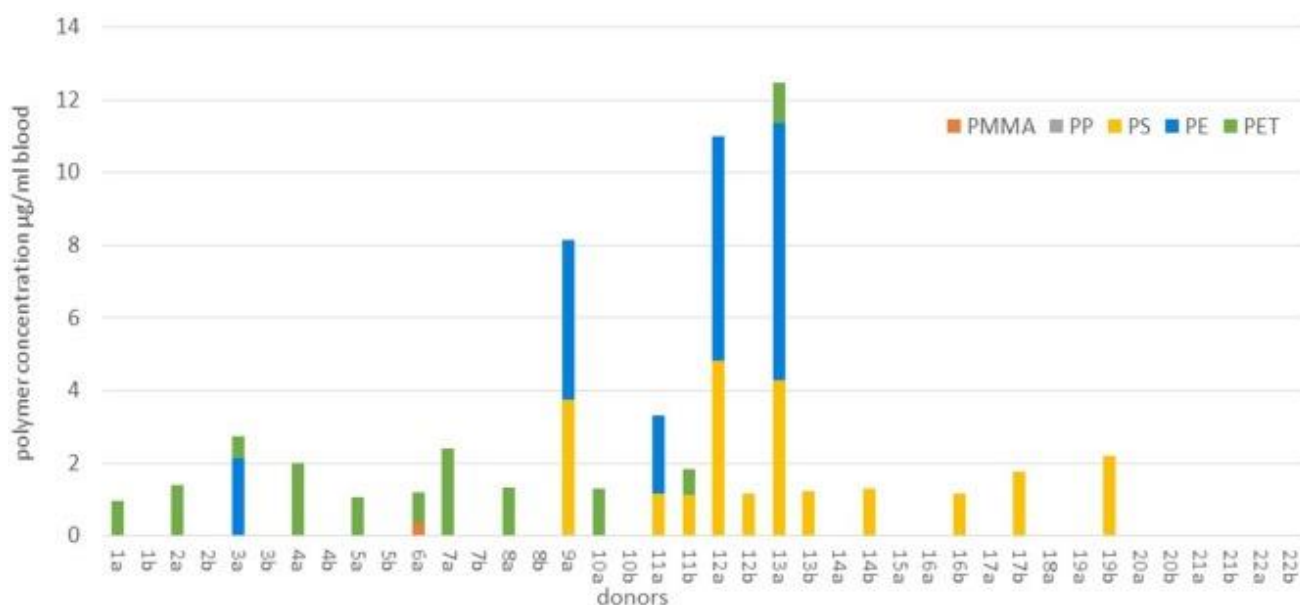


Рис. 3.3 Концентрація частинок пластику за типом полімеру в зразках цільної крові 22 донорів (дублікати а і б, крім № 6, 9, 15 і 18). Усі значення >LOQ

Дані щодо концентрацій у крові були отримані для PMMA, PP, PS, PE та PET, демонструючи, що 77% донорів ($n = 17$ із 22) мали кількісно визначену ($>LOQ$) масу частинок пластику в крові.

Також у вчених є думка, що немовлята отримують пластик під час годування з пластикових пляшок. Американські медики дослідили кал однорічних дітей і виявили в ньому в 13 разів більше мікропластику, ніж у дорослих. Про це свідчать результати дослідження, проведеного американськими вченим на чолі з Курунзахаламом Кеннаном (Kurunthachalam Kannan) з університету Нью-Йорка. Вони вирішили порівняти кількість мікропластику в калі дорослих і дітей. Висновки були опубліковані в *Environmental Science & Technology Letters*. За допомогою мас-спектрометрії експерти вивчали вміст полікарбонату і поліетилентерефталату в зразках випорожнень десяти дорослих, шести дітей віком до одного року і трьох новонароджених. Дослідники стверджують, що мікропластик потрапляє в кишківник немовлят під час нагрівання пляшечок для годування, а також від штучних килимових покриттів. Автори додають, що заковтування мікропластику може бути небезпечним, оскільки дрібні частинки здатні проникати в кровотік і викликати запалення тканин і клітинну смерть. До того ж, мікропластик у формі мікрочастинок вже міститься в складі деяких косметичних засобів.

Люди ковтають такі частинки, не помічаючи їх через надто малі розміри. Мікрочастинки поліпропілену, поліетилентерефталату (PET) і інших пластиків дослідники знаходили у людських випорожненнях, і навіть у плаценті (як у тканинах з боку матері, так і в тканинах з боку плода). У калі дітей вміст PET виявився в 13 разів більше, ніж в калі дорослих: середня концентрація PET в калі дітей дорівнювала 36000 нанограмів на грам фекалій, а в калі дорослих – 2600 нанограмів на грам фекалій, що представлено графічно на рис. 3.4. Різниця в вмісті полікарбонату була не такою значною. Мікропластик знайшли і в

зразках меконію новонароджених, але в концентраціях менше порога кількісного визначення.

Міністерство екології Німеччини та Інститут Роберта Коха провели спільне дослідження «Біомоніторинг людини» і виявили токсичні відходи з пластмаси в 97% дітей, яких запросили для тестування.

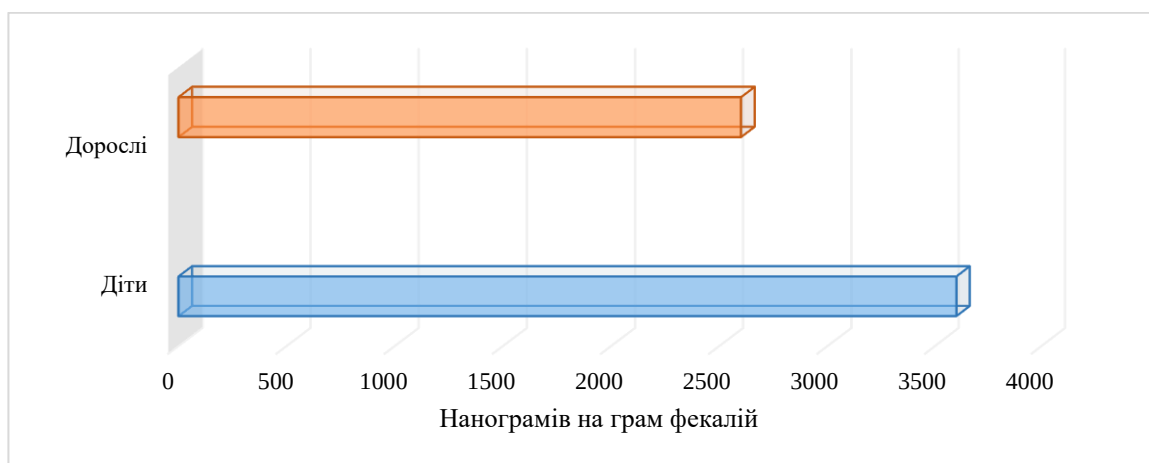


Рис. 3.4 - Середня концентрація PET в калі дітей та дорослих

Зразки крові та сечі були зібрані у 2500 дітей віком від 3 до 17 років. Із 15-ти видів пластиків, наявність яких перевірялася в рамках тестів, в зразках знайшли 11.

Присутність даних пластиків в дитячому організмі підвищує ризик його гормональної дисфункції. Це пов'язано з тим, що на мікрорівні подібна продукція може імітувати дію певних гормонів, що призводить до збою в ендокринній системі людини. Порушення, в свою чергу, можуть проявлятися у вигляді ожиріння, порушення обміну речовин, раку, репродуктивних порушень, відхилень у поведінці або затримки розвитку. Дослідження також показало, що найбільша кількість пластикових залишків виявляється в організмі малих дітей та дітей із бідних сімей.

3.3. Просторовий розподіл мікропластику в донних відкладеннях транскордонної річки – приклад річки Тиса в Центральній Європі

Водозбір річки Тиса поділяють п'ять країн (Словаччина, Україна, Румунія, Угорщина та Сербія); всі ці країни знаходяться в різних економічних ситуаціях, і їхні практики очищення стічних вод відрізняються. У країнах, які раніше приєдналися до Європейського Союзу (Словаччина та Угорщина), системи каналізації побудовані більш щільно, а очищення стічних вод є більш ефективним, тоді як в решті країн водозбору ситуація з очищенням стічних вод менш сприятлива [57]. Таким чином, у цьому міжнародному водозбірному басейні (мікро)пластикове забруднення, ймовірно, різниться між субводозбірними басейнами, і ці коливання, ймовірно, також впливають на просторові варіації мікропластикового забруднення головної річки.

Річка Тиса є притокою р. Дунай і розташована у східній частині Карпатського басейну (рис. 3.5)

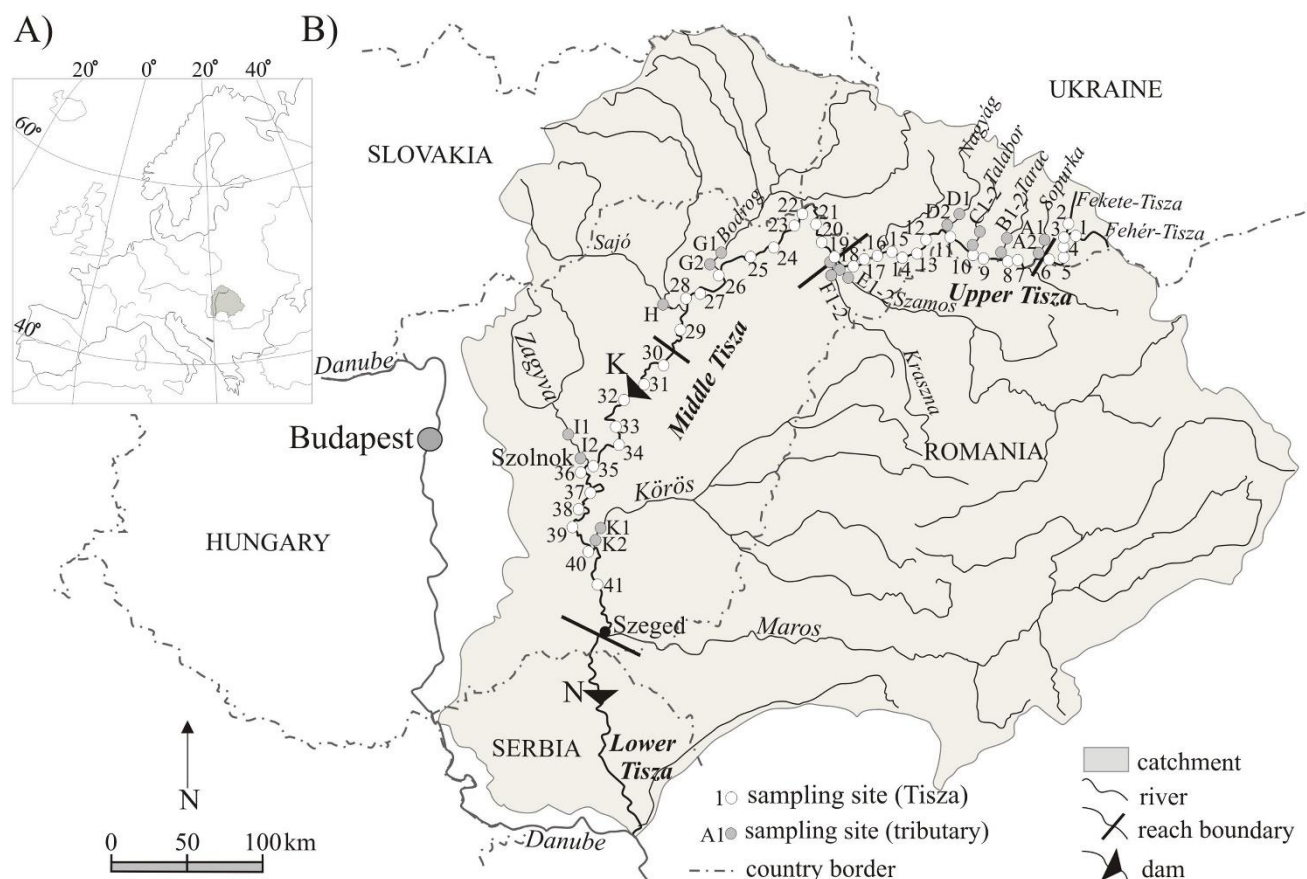


Рис. 3.5 Територією дослідження було обрано р. Тиса та її головні притоки. Розташування відібраних місць відбору вздовж річки Тиса (1–41) та на притоках (A1–K2) позначені кружками. Верхня і Середня Тиса були розділені на дві ділянки. На умови течії Середньої Тиси впливають гребля Кішкере (K) і гребля Нові Бечей (N).

Зростаюча кількість плавучих відходів (переважно комунальних) створює все більшу проблему вздовж річки Тиса, особливо в Угорщині. У 2017 році загальна кількість зібраного плаваючого макропластику, очищеного з русла на угорській ділянці Тиси, становила бл. 90 тонн (3084 м³), більшість з яких (67%) було зібрано в угорській Верхній Тисі [58]. У 2019 році він зріс до 10 000 тонн [59].

У Європі саме Східна Європа має найбільшу кількість неправильно використаного пластикового сміття [60]. Дані щодо стічних вод у національному масштабі [61] показують, що в кожній країні досліджуваного басейну існує розрив між доступом до питної води та підключенням до систем водовідведення та очисних споруд (рис. 3.6) [61].

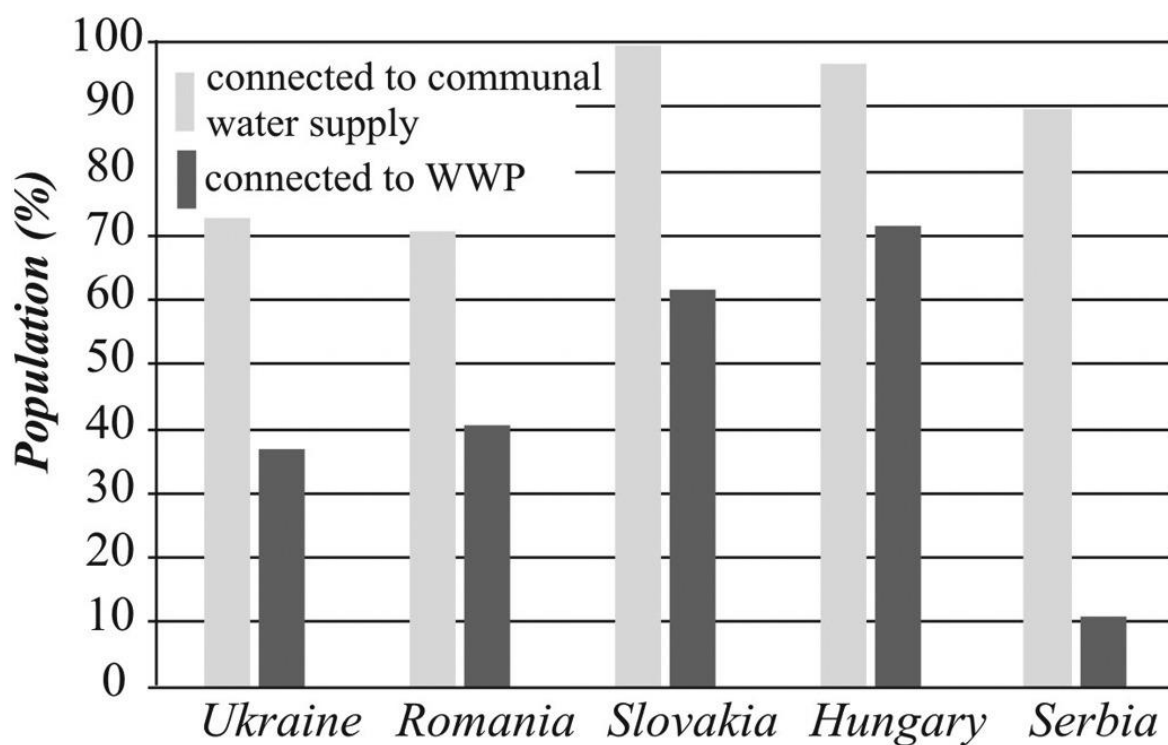


Рис. 3.6 Пропорції населення, підключеного до комунального питного водопостачання та очисних споруд (WWP) у країнах водозбірної басейну річки Тиса.

Розрив у розвитку/фінансуванні між інфраструктурою питної води та очищеної води є важливим показником надходження стічних вод у річки. Домогосподарства, підключені до системи питного водопостачання, обладнані пральними машинами, і це поєднується зі збільшенням використання дешевих синтетичних тканин [62]. Таким чином, у тих районах, де розрив інфраструктури великий, неочищені стічні води напряму зливаються у поверхневі води, збільшуючи їх забруднення мікропластиком. Зазвичай ситуація ще гірша у віддалених сільських районах, де каналізаційні мережі відсутні або їх мало. На водозборі Тиси ситуація найгірша в Україні, де лише 1,5% сільських домогосподарств підключено до системи водовідведення, на відміну від 68% міських домогосподарств [61]. Водозбір Верхньої Тиси знаходиться в Закарпатській області в Україні, і, за даними Тарпая (2013) [63], цей регіон має найгірше управління відходами в Україні; наприклад, у 2011 році в поверхневі водойми було відведено 7,8 млн. м³ неочищених стічних вод.

Тарпай також зазначив, що існуючі очисні споруди в Україні знаходяться в поганому стані; таким чином навіть первинний рівень очищення не є завершеним, тому неналежним чином очищені стічні води відводяться в поверхневі води.

Однак за останні кілька років ситуація покращилася завдяки підтримці Європейського Союзу, наданій державам-членам. Цей результат відображено в даних масштабу поселення з Угорщини вздовж річки Тиса (рис. 3.7).

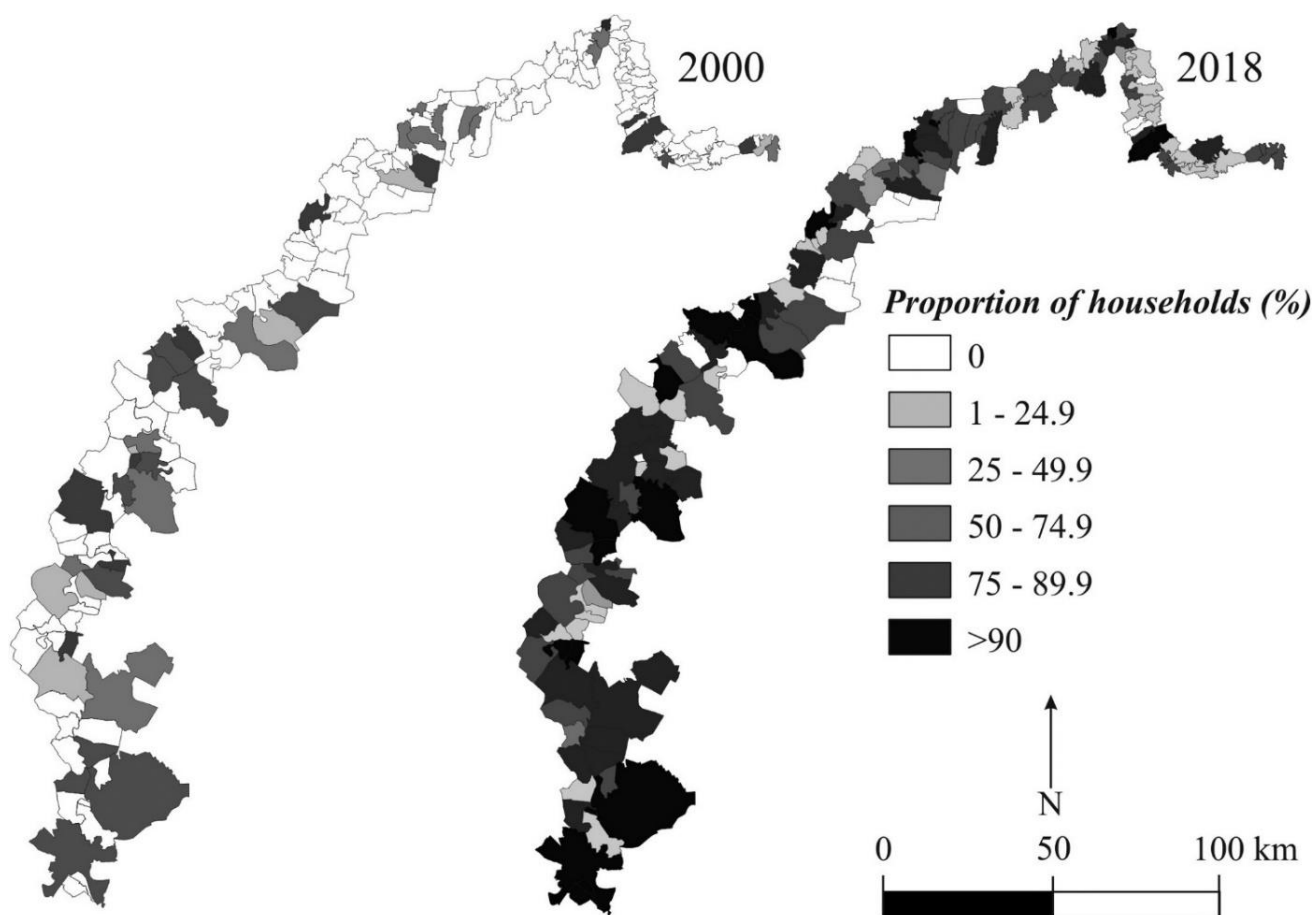


Рис. 3.7 Частка домогосподарств, підключених до каналізаційних систем в угорських поселеннях уздовж річки Тиса у 2000 та 2018 роках

Зразки свіжовідкладених відкладень були зібрані у верхній і середній течії Тиси (Україна та Угорщина) на нижньому етапі (20–25 серпня 2019 р.), між Раховом і Міндсентом (897–218 fkm). Уздовж досліджуваної ділянки Тиси довжиною 750 км розмір зерна відібраних відкладів варіювався між бруківкою (з піщаною матрицею) та піщано-глинистими відкладами; тому зразки були висушені та просіяні, і в подальших аналізах використовувалася лише фракція опадів діаметром менше 2 мм. Під час просіювання зразків ідентифікували грубі мікропластики (2–5 мм), які також були включені під час визначення кількості частинок мікропластику у зразках відповідно до визначення Вебера та Оппа [64].

Частинки мікропластику (0,09–2,00 мм) вилучали із зразків природних опадів за допомогою методу розділення за щільністю. Після проведення деяких тестів стало очевидно, що під час флотації високий вміст мулу та глини у

зразку може негативно вплинути на процес розділення. Таким чином, сухі зразки (50,0 г) були просіяні вологим ситом (розмір осередків: 90 мкм), доки вода, що витікає, не стала повністю прозорою, потім зразки були висушені (70 °С). Для відділення пластичних компонентів від зерен неорганічного осаду до зразків додавали розчин хлориду цинку (1,8 г/см³). Таким чином більшість типів пластику (крім тefлону з 2,2 г/см³ щільність) можна відокремити. Для посилення процесу поділу зразки перемішували протягом 15 хв, а потім центрифугували ще 15 хв (2000 об/хв). Супернатант збирали за допомогою піпетки, його просівали (розмір осередків: 90 мкм) і промивали водою, щоб змити весь розчин хлориду цинку зі зразка. Органічний вміст перетравлювали за допомогою перекису водню (30%) протягом 24 годин. Для підвищення ефективності розділення зразки центрифугували (протягом 15 хв) після кожного кроку. Нарешті, вилучені мікрочастинки пластику вимивали в чашки петрі.

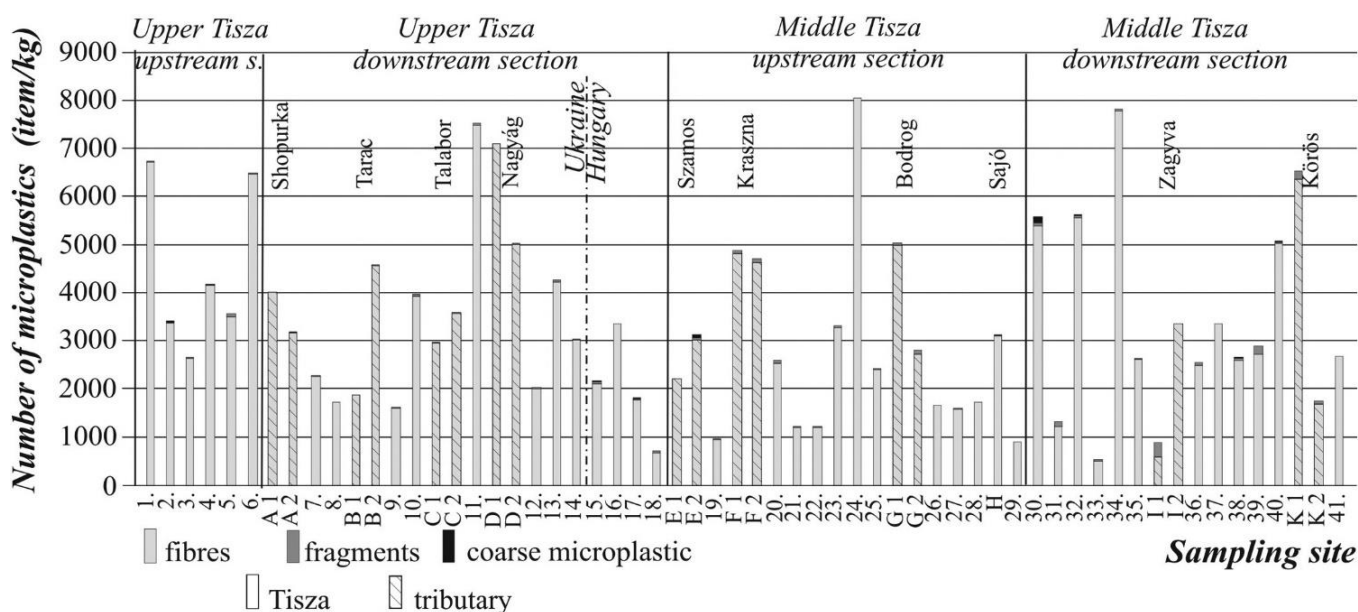


Рис. 3.8 Вміст мікропластику в пробах наносів, відібраних вздовж річки Тиса та її приток (розташування місць відбору зображено на рис. 3.7)

Зразки, відібрані з плеса Верхньої Тиси, містили на 15% більше мікропластику (в середньому 3430 ± 1834 шт./кг), ніж зразки з плеса Середньої Тиси (в середньому 2968 ± 2093 шт./кг; рис. 3.8). Осади, зібрані в місцях

відбору проб в Україні (№ 1–14), містили набагато більшу кількість мікропластику (3810 ± 1826 шт./кг), ніж зразки Верхньої Тиси в Угорщині (№ 15–18: 2004 ± 1084 шт./кг). або зразки, зібрані з усієї угорської ділянки Тиси (№ 15–41: 2825 ± 1991 шт./кг).

Тест Tukey HSD показав (рис. 39), що існують статистично значущі відмінності у вмісті мікропластику між Верхньою Тисою та верхньою частиною Середньої Тиси, а також між двома частинами Середньої Тиси. Проте рівень забруднення Верхньої Тиси та нижньої частини Середньої Тиси суттєво не відрізнявся.

Притоки можуть бути важливими джерелами мікропластику, як припускають Скальська та ін. [65]. На це твердження вказує наше дослідження, оскільки вміст мікропластику в осадах 10 досліджених приток був у середньому на 20% вищим, ніж у головній річці, особливо в притоках, які беруть початок в Україні та Румунії.

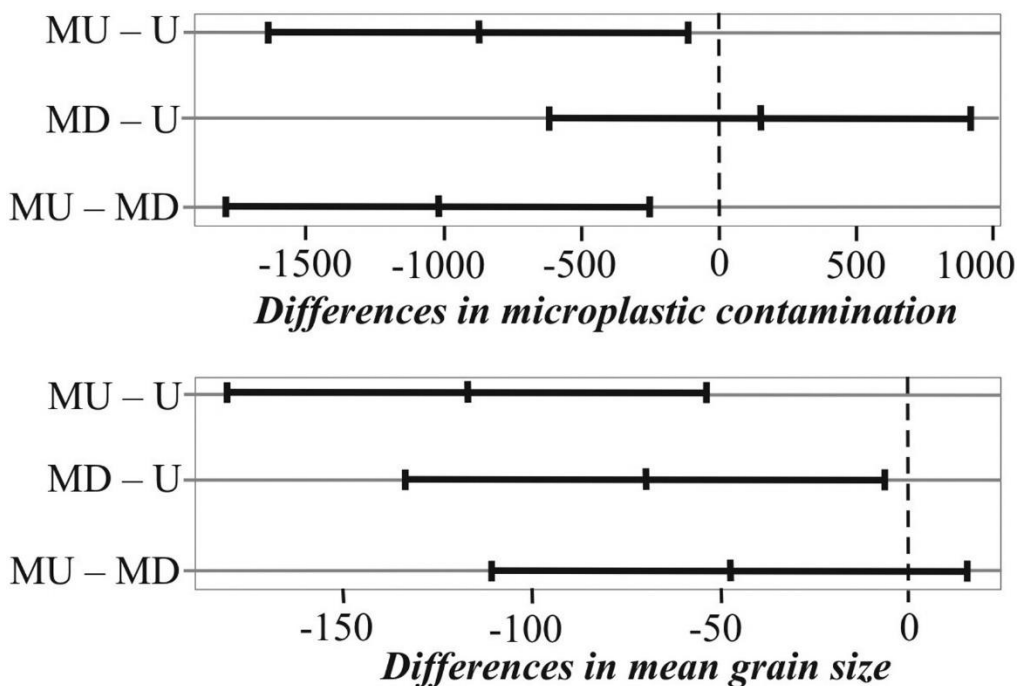


Рис. 3.9 Значимість відмінностей у забрудненні мікропластиком і середньому розмірі зерна зразків, зібраних з різних секцій, оцінено за допомогою тесту Тьюкі HSD (чесна значна різниця). (U: Верхня Тиса; MU: верхня частина Середньої Тиси; MD: нижня частина Середньої Тиси).

Щоб підтвердити це, потрібне більш детальне дослідження, оскільки вода приток у точках відбору проб може бути накопичена головною річкою, що може призвести до прискореної аградації мікропластику. Щоб з'ясувати роль приток у забрудненні мікропластиком, пропонується збір зразків далі від з'єднань. Ефективність забруднення основної річки залежить від стоку притоки відносно основної річки. У межах водозбору р. Тиса, річки Шамош і Красна найбільш ефективно підвищують вміст мікропластику в головній річці, оскільки ці річки збільшують середній стік Тиси на 37,9%. У випадках, коли притока робить менший внесок у сток головної річки, чіткого впливу притоки на головну річку виявлено не було.

Висновки до розділу

Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FT-IR) — це метод, який використовується для отримання інфрачервоного спектру поглинання або випромінювання твердого тіла, рідини або газу. Спектрометр FTIR одночасно збирає спектральні дані високої роздільної здатності в широкому спектральному діапазоні. Це дає значну перевагу перед дисперсійним спектрометром, який одночасно вимірює інтенсивність у вузькому діапазоні довжин хвиль.

Раманівська спектроскопія — це спектроскопічний метод, який зазвичай використовується для визначення мод коливань молекул, хоча також можна спостерігати обертальні та інші низькочастотні моди систем. Раманівська спектроскопія зазвичай використовується в хімії для отримання структурного відбитка, за яким можна ідентифікувати молекули.

Аналітичні дослідження в усьому світі створили великий набір даних про присутність пластикових частинок у різних матрицях, включаючи, наприклад, біоту (або вміст кишечника) вода, осад та продукти харчування.

Дані щодо концентрацій у крові були отримані для РММА, РР, РS, РЕ та РЕТ, демонструючи, що 77% донорів ($n = 17$ із 22) мали кількісно визначену ($>LOQ$) масу частинок пластику в крові.

Зростаюча кількість плавучих відходів (переважно комунальних) створює все більшу проблему вздовж річки Тиса, особливо в Угорщині. У 2017 році загальна кількість зібраного плаваючого макропластику, очищеного з русла на угорській ділянці Тиси, становила бл. 90 тонн (3084 м³), більшість з яких (67%) було зібрано в угорській Верхній Тисі [58]. У 2019 році він зріс до 10 000 тонн [59].

Переробка пластику — це переробка пластикових відходів на інші продукти. Переробка може зменшити залежність від звалищ, зберегти ресурси та захистити навколишнє середовище від забруднення пластиком і викидів парникових газів. Рівень переробки відстає від рівня інших відновлюваних матеріалів, таких як алюміній, скло та папір. Не весь пластик піддається біологічному розкладанню та за відсутності переробки поширюється в навколишньому середовищі [67-68], де може завдати шкоди.

РОЗДІЛ IV. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИДАЛЕННЯ МІКРОПЛАСТИКУ З ВОДИ, ЙОГО ВПЛИВ

4.1 Проблематика виявлення та видалення мікропластику зі складних екологічних матриць

Про присутність мікропластику та його відбору проб, методів вилучення та методів характеристики широко повідомлялося від регіонального до глобального масштабу, особливо у водному середовищі, але по суті, залишається відсутність будь-якої гармонізації щодо протоколів відбору зразків, вилучення або характеристики де мікропластик, присутній у будь-якій даній екологічній матриці. Під час роботи з мікропластиком виникають такі обмеження:

1. Різний діапазон розмірів, який використовувався різними дослідниками: неоднозначність у розмірному діапазоні призвела до використання різних

методів для вивчення мікропластику, особливо при впливі організмів на мікропластик у лабораторних дослідженнях.

2. Ще одним бар'єром є відсутність усіх методик чи приладів у всіх лабораторіях, що вивчають мікропластик. Оскільки науковий кругозір розширюється великими темпами, розробляються нові методики, які роблять стандартизацію практично нездійсненним завданням. Крім того, деякі науково-дослідні установи (академічні установи з обмеженим фінансуванням, малі або нещодавно створені дослідницькі лабораторії, некомерційні організації або дослідницькі установи в країнах, що розвиваються) можуть зіткнутися з фінансовими та ресурсними обмеженнями, що робить впровадження ефективних і спеціалізованих підходів до поділу непомірно дорогим, це призводить до використання простіших і менш точних процедур.

3. Третя перешкода – це складні екологічні матриці, наприклад, робота з осадам стічних вод або стічними водами потребує багато складних кроків саме для вилучення мікропластику, які, в свою чергу, потребують додаткових реагентів та хімікатів, що призводить до збільшення вартості.

Таким чином, в силу перерахованих вище факторів і сприятливих для даного умов існує масив методів, а абсолютний стандартизований методологічний підхід ще не розроблений і не узгоджений.

Найчастіше основний підхід у будь-якому дослідженні мікропластику включає вибірку, екстракцію, характеристику та кількісну оцінку. Незважаючи на кількість статей, опублікованих після того, як у 2011 році ЮНЕП оголосила мікропластик світовим забруднювачем, все ще залишається багато прогалин у знаннях через відсутність гармонізованих методологій. Незважаючи на те, що у 2004 році мікропластик був в першу чергу визначений як екологічна проблема, лише у 2020 році ISO надала визначення для мікропластику, надавши такі необхідні вказівки для дослідницької спільноти.

Як наслідок, науку про мікропластик можна вважати такою, що перебуває в зародковому стані, і тепер вона має одну визначену змінну – розмір. Однак

основна проблема пов'язана з вилученням мікропластику, оскільки поведінка пластику змінюється зі зміною профілю навколишнього середовища, і кожна матриця вимагає власного набору протоколів для більш ефективного та розсудливого аналізу. Є різні методи видобутку, які часто використовуються в науковій літературі, та пов'язані з ними модифікації для цілого ряду екологічних матриць: води (прісна вода, питна вода та стічні води), ґрунту, осаду, біологічної тканини та повітря.

Ідентифікація та характеристика мікропластику ґрунтується на екстракції та очищенні з подальшою ідентифікацією та кількісною оцінкою, включаючи заходи контролю якості на кожному етапі. Вилучення мікропластику з будь-якої екологічної матриці є найважливішим кроком, оскільки на нього впливає розмір, форма та щільність як типу матриці, так і присутньому мікропластику. Звідси випливає, що можлива диференціація процесів екстракції може бути заснована на типі аналізованої матриці. Мікропластик повинен бути ізольований від екологічної матриці з метою характеристики та ідентифікації. Є багато статей, в яких висвітлюється процес відбору проб та екстракції для складних матриць. Крім того, завдяки різним факторам, таким як фінансування, демографія, лабораторні ресурси та тип матриці, постійно розробляються нові протоколи. Останніми роками було опубліковано кілька статей про наявність, зміст, розподіл та забруднення мікропластиком у різних екологічних матрицях, але не систематично. Наскільки відомо дослідникам, не існує оцінок, які всебічно та одночасно ілюструють методики вилучення мікропластику із широкого спектру екологічних матриць, оскільки більшість оглядів є матричними специфіками [89-94].

Розуміння долі та ефектів мікропластику може бути досягнуто двома шляхами: по-перше, через підхід хімії навколишнього середовища, в якому вивчаються ефекти різних природних матриць (повітря, вода, ґрунт і біота); і, по-друге, з аналітичною хімією, де розробляються аналітичні методи для вирішення проблем, пов'язаних з мікропластиком [95]. Розробка нових

стратегій відбору проб за допомогою польових досліджень, а також розробка та прогрес аналітичних методологій, що забезпечуються розробкою концепцій аналізу потоків і стратегій аналізу процесів, забезпечили зв'язок між сучасними приладами та соціальними або технологічними проблемами навколишнього середовища останнім часом. Незалежно від оптимального аналітичного підходу для виявлення мікропластику, складним питанням, яке було широко досліджено, є видалення та ізоляція пластикових частинок, що походять із різноманітних і складних екологічних матриць. Інструментальні технології та аналітичні методи просунулися настільки, що тепер вони пропонують широкий спектр інструментів для визначення широкого діапазону аналітів при дуже низьких рівнях концентрації.

З аналітичної точки зору, визначальними атрибутами методики, які вважаються найважливішими для аналітики при застосуванні найбільш прийняттого методу для отримання значущої інформації, є точність, специфічність і чутливість [96]. У цьому контексті кількісна оцінка має вирішальне значення для оцінки вибірки та порівняння аналітичних підходів і методологій. Однак у режимі реального часу необхідно враховувати певні практичні фактори, такі як час, необхідний для проведення аналізу зразка, витрати та зручність техніки для користувача, які є важливими екологічними та аналітичними міркуваннями. Екологічна перспектива є відносно новими в аналітичній хімії, і з точки зору досліджень мікропластику, це слід ретельно враховувати, щоб забезпечити довгострокову еволюцію аналітичних підходів у галузі мікропластику (рис. 4.1).



Рис. 4.1 Основні міркування щодо створення ефективного екологічно чистого аналітичного підходу для мікропластику

Значний вплив на спосіб вибору має матриця; застосована техніка може бути абсолютно різною для різних матриць. Розуміння складу та властивостей матриці має важливе значення для вибору оптимального аналітичного підходу на основі цілей дослідження та наявних ресурсів, щоб забезпечити гармонізацію та узгодженість для цілей стандартизації. У моніторингових дослідженнях матриця зразків для аналізу (наприклад, вода, повітря, ґрунт та біота) повинна бути обрана залежно від цілей дослідження, причому різні матриці надають різну інформацію щодо забруднення мікропластиком у навколишньому середовищі.

Безсумнівно, важко розробити новий метод для визначення того, які полімери (часто деградовані) присутні, а також рівні їх концентрації, розмір, форму та колір у екологічних матрицях, які відрізняються за хімічними та фізичними властивостями.

Крім того, план експерименту повинен враховувати змінні місця відбору проб, які, ймовірно, впливатимуть на отримані дані, включаючи потенційну

близькість до джерела, фізичні та хімічні властивості матриці та, у випадку біотичних матриць, нішу живлення.

Широка категорія компонентів навколишнього середовища включає воду, повітря, ґрунт/осади та біоту. Основною причиною вибору різних матриць є те, що хімічна природа цих матриць неоднорідна, що призводить до широкого діапазону характеристик, функцій і взаємодій з мікропластиком. Наприклад, зразки відкладень з пляжів, узбережжя, донних середовищ існування, річок і озер є прикладами відкладень, які можна охарактеризувати навколишнім середовищем [97]. Більшість досліджень мікропластику зосереджено на водному середовищі [98], особливо на поверхневих водах, але варіації в гідродинамічних профілях різних водних тіл сприяють відмінностям у кількості та властивостях присутньому мікропластику [99]. Наприклад, річки мають односпрямовану течію з відносно високою середньою швидкістю течії, коливається від 0,3 до 1 мс⁻¹ [100], тоді як озера мають помірну середню швидкість течії від 0,001 до 0,005 м⁻¹ [101], а підземні води мають досить постійну схему потоку з точки зору напрямку та швидкості (кілька метрів на день, приблизно 10⁻⁴ мс⁻¹) [102-104]. Ці різноманітні профілі в різних середовищах впливають на відкладення осаду, присутність флори та фауни та рух частинок мікропластику, таким чином, впливаючи, у свою чергу, на методологію відбору проб та екстракції [105].

Багато інформації було отримано з визначення мікропластику у пробах води та біоти порівняно з ґрунтами. Ґрунти складаються з неущільнених органічних і неорганічних речовин, що утворюються в результаті взаємодії води, повітря і організмів на земній поверхні. Він служить бар'єром між окремими частинами навколишнього середовища в наземних екосистемах (літосфера, гідросфера, біосфера та атмосфера). Методи, які використовуються для вилучення мікропластику з ґрунту та осаду, можуть різко відрізнятися. Видалення органічної речовини нечасто виконується при вивченні відкладень з переважанням мінералів, таких як відкладення піщаних пляжів, але це зазвичай

є вимогою для низькоенергетичних естуарійних, озерних або пелагічних відкладень, а також це потрібно при оцінці ґрунту. Вилучення мікропластику із ґрунтів є складнішим, ніж із води, враховуючи складний і різний склад різних типів ґрунтів [106].

Візуальне сортування, просіювання або фільтрація регулярно використовуються для відділення більшого мікропластику від дрібних відкладень (мулу або осаду). Малий мікропластик може бути важче відокремити, особливо від дрібнозернистих відкладень, залежно від структури (часток, волокон, форми та розміру) присутнього мікропластику. Є певні методи виділення мікропластику з різних матриць (таблиця 4.1):

Таблиця 4.1

Методи виділення мікропластику з різних екологічних матриць

Методи	Опис методу
1	2
Розділення за щільністю	Цей метод був розроблений Thompson et al., 2004, і передбачає виділення мікропластику з осаду за допомогою концентрованого сольового розчину [107]. Цей метод придатний лише для [полімерів із щільністю, нижчою, ніж

Продовження таблиці 4.1

1	2
	у гіперсольового розсолу. Багато методів і пристроїв, а саме MPSS, методи елютрації та методи пінної флотації, використовують принцип розділення за щільністю та детально обговорюються пізніше.
Окислювальне розщеплення	Цей метод використовує окислювачі,

	такі як H_2O_2 , для видалення природного органічного сміття, залишаючи мікропластик без впливу [108]. Ця попередня обробка зазвичай супроводжується розділенням за щільністю або фільтрацією.
Лужне травлення	Різні комбінації KOH і NaClO довели свою ефективність у вилученні мікропластику з біологічних тканин [109].
Кислотне розщеплення	Суміші HNO_3 і HClO_4 в основному використовуються для екстракції мікропластику з біологічної тканини [110-111]. Тим не менш, виникло занепокоєння щодо шкідливого впливу цих кислот на часто зустрічаються полімери [109].
Ферментативне травлення	Серед кислотного травлення, лужного травлення та ферментативного травлення останнє, здається, є

Продовження таблиці 4.1

1	2
	найбільш ефективним, без видимого впливу на мікропластик під час процедури [112].

Протокол екстракції олії	Грунтуючись на олеофільних властивостях полімерів, цей метод був розроблений у 2017 році для вилучення мікропластику з матриць навколишнього середовища за допомогою екстракції олії. Змішування осаду з водою та ріпаковою олією відокремлює мікропластик у масляній фракції від осаду, що осів у водному шарі [113].
Екстракція рідини під тиском	Цей метод був оптимізований для екстракції мікропластику із ґрунтів і відходів у 2016 році [114] і базується на використанні розчинників в умовах субкритичної температури та тиску, головним чином для відновлення напівлетких органічних речовин із твердих матеріалів. На першій фазі екстракції напівлеткі органічні речовини видаляють за допомогою метанолу при 100 °C, а мікропластик згодом відновлюють із решти матриці за допомогою DCM при 180 °C.

Продовження таблиці 4.1

1	2
Електростатична сепарація	Спочатку використовувалася в 2011 році [115], вона була успішною лише

	для вилучення зразків опадів із добавками. Однак у 2018 році для вилучення мікропластику з кварцу та пляжного піску було використано електростатичний сепаратор KWS [116].
Магнітне розділення	Представлений у 2019 році, цей метод заснований на використанні гідрофобної поверхні пластмас для їх намагнічення для ізоляції мікропластику із зразків ґрунту [117].

Необхідно підкреслити, що вищезазначені методи не можуть бути застосовані до кожного типу матриці та класифіковані вище на основі зразка матриці, про який повідомляється в літературі. Більш корисний підхід до застосування цих методів для різних типів матриць представлений у наступних розділах.

4.2 Методи вилучення мікропластику

Моніторинг навколишнього середовища є важливим для здоров'я, благополуччя та захисту екосистеми. Екосистеми є динамічними середовищами з характерними функціями, процесами та живими організмами, які піддаються впливу забруднень навколишнього середовища, включаючи мікропластик. У дослідженні мікропластику екстракція — це процес відокремлення та очищення фрагментів мікропластику від зразка середовища, тоді як сепарація передбачає сортування або поділ пластику на різні типи за формою, розміром і кольором. Вода, ґрунт, повітря та біота є чотирма основними елементами навколишнього середовища, у яких можна відбирати зразки з різних екосистем для цілей

моніторингу. Порівняльний аналіз методів видалення мікропластику з води наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Порівняльний аналіз методів видалення мікропластику з води

Метод видалення	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Застосування
1	2	3	4	5
Фільтрація	Механічне затримування частинок мікропластику на фільтрах різної пористості	Висока ефективність для великих частинок, відносна простота	Вимагає періодичної заміни фільтрів, може бути неефективним для дуже дрібних частинок	Очищення питної води, промислових стічних вод
Флотація	Підняття частинок мікропластику на поверхню за допомогою бульбашок повітря	Ефективна для легких частинок, низькі енерговитрати	Може бути недостатньо ефективною для щільних частинок, вимагає додаткових стадій очищення	Очищення стічних вод, очищення природних водойм
Осадження	Осадження частинок мікропластику під дією сили тяжіння або центробіжної сили	Простий метод, не вимагає спеціального обладнання	Низька ефективність для дрібних частинок, тривалий процес	Попереднє очищення та обробка води перед іншими методами

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
Коагуляція	Нейтралізація заряду частинок мікропластику за	Ефективна для зменшення	Вимагає точного дозування	Як попередній етап перед фільтрацією

	допомогою коагулянтів (солі алюмінію, заліза)	поверхневого заряду частинок, сприяє подальшому процесу флокуляції	коагулянтів, може призводити до утворення осаду	або осадженням
Флокуляція	Об'єднання коагульованих частинок в більші флокули за допомогою флокулянтів (полімери)	Сприяє утворенню великих частинок, які легше видаляються фільтрацією або осадженням	Вимагає додавання флокулянтів, може впливати на властивості води	Як проміжний етап між коагуляцією та подальшим очищенням
Адсорбція	Поглинання мікропластику поверхнею адсорбенту(активоване вугілля, цеоліти)	Висока ефективність для органічних забруднень, можливість одночасного видалення інших домішок	Вимагає великої кількості адсорбенту, може бути дорогим	Очищення питної води, очищення стічних вод
Окиснення	Руйнування мікропластику під дією окислювачів (озон, перекис водню)	Ефективне для деградації органічних сполук, що входять до складу пластику	Може утворюватися токсичні побічні продукти, вимагає високих енерговитрат	Очищення стічних вод
Біологічне розкладання	Використання мікроорганізмів для розкладання	Екологічно чистий метод	Довгий процес, ефективність	Перспективний метод для біоремедіації

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
	мікропластику	використання природних ресурсів	залежить від типу пластику та	забруднених вод

			умов середовища	
--	--	--	--------------------	--

Видобуток із трьох S: осад, пісок і ґрунт (Three S's: Sediment, Sand, and Soil)

Через яскраве, величезне скупчення пластикового сміття в океанах і вплив на морські організми, більшість уваги та досліджень зосереджено на морському середовищі [98]. У той час як пластикові відходи накопичуються у воді та транспортуються нею у зв'язку з течіями та погодними умовами, мало відомо про роль ґрунту та відкладень у переміщенні, обробці та зберіганні пластмас [118]. Наземні екосистеми (відкладення, ґрунт, компост і пісок), які особливо схильні до забруднення пластиком, є відносно невивченими та є ключовими факторами виробництва та поширення мікропластику. Ступінь осідання та накопичення пластику в цих матрицях має вирішальне значення для розуміння їхнього впливу на навколишнє середовище, оскільки присутність мікропластику може бути шкідливою для організмів [118]. Дослідники в усьому світі використовували широкий спектр процедур обробки та аналізу зразків, перешкоджаючи порівнянню між цими різними географічними положеннями і, таким чином, ще більше погіршуючи розвиток повної перспективи вивчення мікропластику у ґрунтах і відкладах.

Відкладення та ґрунти відкладаються на різних ділянках вітром та стоком і вважаються довгостроковими поглиначами мікропластик [119]. Найкраща стратегія видалення мікропластику з опадів і ґрунтів є першочерговою проблемою, і розробка надійного методу ідентифікації мікропластику, присутніх у цих матрицях, має вирішальне значення для кращого розуміння розподілу, маси та екологічних ефектів мікропластику як у морській, прісноводній, і наземні екосистеми.

Перший звіт про наявність поліолефінів у пляжних відкладеннях датується 1977 роком, коли дослідження, проведене на 300 пляжах у Новій Зеландії, спостерігало наявність первинних поліолефінів у формі первинних

пластикових гранул [120]; однак, минуло два десятиліття потому, коли мікропластик був витягнутий та кількісно визначений вперше в пляжних відкладеннях [107]. На сьогоднішній день розроблено різні методи, починаючи від одностадійної екстракції і закінчуючи комплексними методами, заснованими на олеофільних, електрофільних або магнітних властивостях. Вилучення мікропластику із ґрунтів є більш складним, ніж із опадів і піску, через неоднорідність ґрунту, а вимоги до методів перетравлення органічних речовин є більш поширеними після першого етапу вилучення. Органічна речовина ґрунту є гетерогенною сумішшю хімічних компонентів, і хоча точний хімічний склад залишається джерелом суперечок, широко визнано, що гумусові сполуки складаються з поліфенолів, пептидів, ліпідів і полісахаридів.

Метод магнітної сепарації для виділення та видалення мікропластику цікавить тим, що магнітне поле, яке є джерелом контрольованої сили у дослідженнях сепарації, і при пошуку відповідних методів видалення є одним із найбільш легко масштабованих способів використання магнітних адсорбентів. Воно використовує магнітне навантаження та кислоту в поєднанні із зовнішнім магнітним полем для збільшення швидкості сепарації. Полімери гідрофобні; таким чином, гідрофобні магнітні матеріали можуть бути використані для адсорбції та подальшого збору їх для видалення.

Синтезовані гідрофобні наночастинки заліза (Fe-NP), які зв'язуються з пластиком шляхом силанізації та сприяють магнітному відновленню, є новим підходом для магнітної екстракції мікропластику із зразків осаду та води [117, 121]. Ця технологія базується на використанні спеціалізованих наночастинок Fe-N, які зв'язуються з полімерами та дозволяють магнітне відновлення, і ці налаштовані на замовлення наночастинки, які мають високе співвідношення площі поверхні до об'єму, обробляються силаном із розширеними вуглеводневими хвостами для покращення гідрофобності і сорбцію до мікропластику. Було показано, що магнітна екстракція була більш ефективною для видалення невеликого мікропластику, а швидкість відновлення відкладень

була низькою, оскільки частинки ґрунту перешкоджали зіткненню Fe-НЧ із мікропластиком через відносно нижче співвідношення площі поверхні до об'єму мікропластику. Крім того, якщо ліпофільні хімікати або біота присутні у зразках ґрунту, неспецифічне зв'язування наноматеріалів значно обмежить вплив, і, як наслідок, ця технологія може бути більш придатною для етапів розділення після щільності або травлення, а також для питної води. У цьому відношенні було отримано відносно високе вилучення (93% для зразків води та 78% для зразків осаду), і технологія може бути застосована для майбутніх досліджень мікропластику.

Малі частинки мікропластику можуть бути успішно виділені з розведених розчинів за допомогою магнітного фільтрування [112], і ця процедура не змінює структурну цілісність зразка; однак залишається багато прогалин у знаннях, і, як наслідок, більшість досліджень наголошують на використанні цієї методики як попередньої обробки, а не як окремого підходу до відділення.

Електростатичне розділення

Електростатичне розділення є потенційним підходом, який використовувався при переробці пластикових відходів. Критичним аспектом у спробах спростити розділення мікропластику є те, що об'єм зразка повинен бути зменшений, а біологічні компоненти повинні бути усунені без впливу на характеристики частинок. Зменшення маси зразка призведе до значного зменшення кількості хімікатів, необхідних для подальшої обробки. Спираючись на цю теорію, Felsing et al. запропонував Корону–Вальцена–Шейдера (KWS), пристрій, який використовується в промисловості переробки та використовує переваги електростатичних характеристик пластмас [116].

Ідея цього методу базується на різноманітній електропровідності частинок зразка, причому мінеральні частинки в ґрунті та піску є більш провідними, ніж полімери загалом. Електричне поле високої напруги (макс.

35кВ, постійний струм) між заземленим барабаном і розташованим над ним електродом у формі граблі заряджає частинки.

Мінеральні частинки, які мають більшу провідність, швидше розряджаються та вискакують з барабана, а роздільна заслінка спрямовує їх у «контейнер для осадів». Менш електропровідні полімери розряджаються повільніше та залишаються прилиплими до обертового барабана, щоб потім від'єднатися та потрапити в окремий контейнер для збору. Тут важливо використовувати добре висушені та неконсолідовані зразки; інакше сепаратор не зможе відокремити компоненти, оскільки присутність води змінює електростатичну поведінку частинок, і це також трудомісткий етап, який триває до кількох днів.

Електростатичне розділення було розроблено як безпечний для навколишнього середовища метод серед усіх процедур розділення, оскільки він дозволяє генерувати фракції, збагачені цікавими елементами, з частинок біомаси розміром від 10 до 500 мкм, але в нещодавньому перевіреному дослідженні деякі з недоліків KWS були виділені. Процес сушіння зразків є виснажливим, а такими параметрами, як вологість перед сублімаційним сушінням, важко керувати. Інше обмеження в даних спостереженнях за ґрунтом вказує на те, що наявність дрібних часток і агломератів (як це характерно для ґрунтів) обмежує використання KWS. Електростатичне розділення мікропластику потребує подальших процесів обробки, таких як розділення за щільністю та розщеплення. Однак, один важливий елемент, який слід враховувати при порівнянні експериментів з електростатичним розділенням, полягає в тому, що мінеральний склад має значний вплив на швидкість відновлення [123]. Електростатична сепарація не потребує хімічної обробки, хоча вона найкраще підходить для великих зразків; однак втрата осаду є недоліком.

Зразки води

Перші оцінки пластику в прибережному та морському середовищі базувалися на смітті, що плаває на поверхні або безпосередньо під поверхнею океану. Більшість досліджень щодо забруднення пластиком було проведено в морському середовищі, ймовірно тому, що майже половина всього виробленого пластику має нижчу щільність, ніж морська вода, і, як очікується, буде плавати в морі. Крім того, NOAA здійснило єдину спробу стандартизації методологій відбору проб мікропластику, яка зосереджена на матрицях води та осаду [124].

Однак цю рекомендовану методологію можна використовувати лише для визначення пластику розміром від 0,3 до 5 мм, включаючи ПЕ (0,91–0,97 г/мл), ПП (0,94 г/мл), ПВХ (1,4 г/мл) і PS (1,05 г мл⁻¹), таким чином обмежуючи діапазон можливого мікропластику, виявленого у зразках води. Цей технічний меморандум, з іншого боку, можна розглядати як перший крок до так бажаної стандартизації процедур відбору та обробки проб для мікропластику у воді та осадах.

Вода як екологічна матриця охоплює різні форми, включаючи прісну воду (поверхневі води та підземні води, включаючи питну воду), морську воду та стічні води.

Розподіл мікропластику у товщі води визначається їхніми фізичними характеристиками (щільністю, формою та розміром) та факторами навколишнього середовища (біологічне забруднення, течія води, хвилі, гідродинамічні профілі та щільність). Прісна та солоня вода мають різну щільність 1,00 г/см³ і 1,03 г/см³ відповідно, що може сприяти різному розподілу мікропластику у водному стовпі в обох системах [125].

Стічні води – це ще одна категорія води, яку досліджували на наявність мікропластику [126]. Зразки прісної води часто містять більшу кількість природних частинок, ніж поверхнева морська вода, що ще більше ускладнює аналіз зразків. Щоденно на очисних спорудах виявляється велика кількість мікропластику, оскільки процес очищення видаляє мікропластик лише на етапі

аерації, а значна кількість мікропластику виходить через фільтр і потрапляє у приймальні води.

Щоб ідентифікувати мікропластик у цих складних (тобто з численними типами матриць) і насичених органікою екологічних матрицях, потрібні відповідні аналітичні методи. У багатьох випадках для усунення як мінеральних, так і біогенних речовин із зразка використовується комбінація методів розділення за щільністю та розщеплення органічних речовин [127].

Незважаючи на те, що процеси відбору проб у прісноводних і морських умовах схожі, кількість органічних і неорганічних сполук у пробах значно відрізняється. Відбір мікропластику з водних джерел повинен проводитися відповідно до характеру води; наприклад, для питної води та бутильованої води достатньо простої фільтрації або просіювання з наступним фарбуванням, тоді як для зразків, що містять органічні речовини, потрібні методи травлення.

Метод зменшення об'єму води

Об'єм зібраних проб води коливається між дослідженнями; лише частина зразка становить інтерес і зберігається для подальшої обробки. Фільтрація вважається першим кроком у вилученні мікропластику із проб води великого об'єму.

Процедури поділу за розміром, такі як просіювання та фільтрування, широко використовуються для вилучення мікропластику із зразків навколишнього середовища з метою зменшення кількості зібраних зразків. Хоча вплив просіювання на полімери, особливо зістарені та вивітрювані полімери, рідко обговорюється, перенесення зразка через сита може призвести до втрати мікропластику, фрагментації або перехресного забруднення зразків.

Зразки води можна спочатку просіяти за допомогою сита 500 меш. Для складних і багатих органікою зразків води центрифугування є корисною альтернативою просіюванню як методу зменшення об'єму води; однак обробка

зразків займає багато часу і не підходить для морських і лиманних зразків, які потребують великих обсягів.

Центрифугування було застосовано до стічних вод біотвердих речовин, снігу, рослинних зразків і досліджень біоти [128]. Після зменшення об'єму відповідний підхід для подальшого аналізу визначається джерелом проби води.

Зразки чистої води: від питної до морської

Постачання питної води, включаючи бутильовану та мінеральну, надходить із поверхневих або підземних джерел. Майже вся питна вода, отримана з поверхневих вод, фільтрується, а деякі додатково обробляються.

Адсорбція, коагуляція, мембранна фільтрація, окислення та мікробна деградація є найпоширенішими способами видалення мікропластику із цих типів зразків і вимагають мінімальної попередньої обробки або взагалі не потребують (у випадку бутильованої води), а екстракцію можна проводити за допомогою просіювання або вакуумної фільтрації. Розділення за щільністю можна безпосередньо застосувати до зразків із низьким вмістом органічних речовин, і, якщо необхідно, можна провести подальше розщеплення органічних речовин.

Нещодавно було продемонстровано свіжу концепцію ідентифікації полімерного типу мікропластику у польових умовах із використанням розділення за щільністю з допомогою нешкідливих реагентів [129], головним чином для вирішення проблем, з якими стикаються вчені, які працюють у віддалених районах і не мають доступу до аналітичного обладнання. Цей метод передбачає використання комбінацій етанолу, дистильованої води та цукру для отримання різноманітних розчинів із різною специфічною щільністю та полімерами, які потім класифікуються на основі їхньої здатності плавати чи тонути у конкретних розчинах. Цей підхід виявився успішним у розрізненні семи звичайних полімерів, взятих із води та берегової лінії Самоса, грецького острова в Егейському морі [129]. Наприклад, за співвідношенням EtOH/H₂O

можна відрізнити LDPE і HDPE на основі їхньої плавучості в даному розчині. Цей підхід, як правило, можна сформулювати шляхом введення зелених, екологічних аспектів і аспектів сталого розвитку, наприклад, до аналізу мікропластику [130].

Стічні води

Стічні води та мул є складнішими зразками для аналізу через щільну матрицю органічних компонентів, бактерій і неорганічних частинок, з'єднаних разом біополімерами, які мають високу спорідненість з більшістю полімерних поверхонь.

Крім того, більшість досліджень на сьогоднішній день включають різні об'єми зразків і використання різних сит, сіток та інших пристроїв для відбору проб [131].

Крім того, різні типи полімерів є предметом різних досліджень, і існує багато неузгодженостей щодо стратегій відбору проб (індивідуальні та складені зразки). Незважаючи на те, що було розроблено багато методів визначення концентрації мікропластику у воді та мулі, залишається багато прогалин у знаннях.

Великі частинки пластику ефективно видаляються під час очищення стічних вод, тоді як мікропластик часто обходить процес очищення та накопичується в приймальних водах. Крім того, значна кількість очисних споруд розташована вздовж узбережжя, що є значним джерелом забруднення морського середовища [131].

Особлива увага приділяється мікропластику, що походять з ПХХП, які визнані важливим джерелом мікропластику у стічних водах і, отже, у поверхневих водах мікропластик розміром від $> 0,1$ мкм до ≤ 1 мм і спеціально додається як очищаючі або відлущувальні агенти до різних засобів особистої гігієни, косметика та засоби для чищення (Personal-Care, Cosmetic, and Cleaning Products (PCCPs)) (гелі для душу, скраби для обличчя та тіла, зубна паста, лаки

для нігтів тощо). Найбільш часто використовуваним полімером для цієї мети є PE [132-133]. Навантаження на водне середовище мікропластиком з цього джерела виникає внаслідок їх застосування в повсякденній діяльності людини, в результаті чого вони вимиваються у стічні води, потрапляючи на очисні споруди, або безпосередньо викидаються у водне середовище [134].

Тому дослідники застосовують різні процедури для виділення мікропластику з косметичних продуктів, щоб дослідити потенційний шкідливий вплив на навколишнє середовище. Більшість робіт на цю тему було опубліковано в період з 2015 р., який є періодом, коли ПХХП були визнані джерелом мікропластику у навколишньому середовищі [134-145].

Подібний метод з незначними модифікаціями використовувався в дослідженнях, у яких мікропластик був виділений з РССР. Як правило, процедура виділення складається з чотирьох етапів:

1. Розчинення 0,5–10 г РССР у деіонізованій воді (150–1000 мл), використовуючи перемішування, з нагріванням або без нього.
2. Фільтрація різними фільтрами (фільтровий папір Whatman™, фільтр для кави, фільтр Filter-Lab 1242, целюлозний фільтрувальний папір, нітроцелюлозна мембрана, целюлозні фільтри Macherey-Nagel, фільтри з нержавіючої сталі та ін.), розмір пор яких коливався від 0,45 до 12 мкм.
3. Промивання деіонізованою водою.
4. Сушіння при кімнатній температурі або при температурі 50–60 °C протягом 7–24 годин або до постійної маси [134, 138, 140, 144].

Після виділення мікропластику з РССР проводили подальшу характеристику частинок за розміром, формою, кольором тощо. Крім того, частинки використовувалися для вивчення взаємодії з іншими компонентами, оцінки кількості мікропластику, що досягає потоків стічних вод, і екотоксикологічних досліджень. Було виявлено, що мікропластик, виділений з РССР, мають хороший адсорбційний потенціал щодо інших забруднюючих речовин у воді, а екотоксикологічні тести показали, що вони мають

потенційний негативний ефект [135, 140-141]. Незважаючи на те, що протягом останніх двох років багато компаній відмовилися від застосування мікропластику у РССР і замінили їх більш екологічно чистими варіантами, забруднення цих типів мікропластику все ще присутні у водних екосистемах, і дослідження їх поведінки все ще необхідні.

Традиційні системи очищення стічних вод

Для видалення часток, органічних матеріалів і, в деяких випадках, поживних речовин зі стічних вод, традиційне очищення стічних вод використовує комбінацію фізичних, хімічних і біологічних процесів і дій. Відповідно до рівня обробки, від найнижчого до найвищого, загальна термінологія, яка використовується для опису різних ступенів очищення, включає підготовчу, первинну, вторинну, третинну та/або розширену очистку стічних вод.

Незважаючи на те, що широко використовувані процеси в очисних спорудах, такі як ультрафільтрація та мембранна фільтрація, не призначені спеціально для видалення мікропластику зі стічних вод, досягається чудова ефективність видалення.

Відповідно до різних етапів очищення стічних вод при попередній обробці видаляється зазвичай 35-59% мікропластику, а при первинній – 50-98%. На цьому етапі основним методом видалення мікропластику є зняття та осідання захопленого мікропластику під час гравітаційного розділення. Незважаючи на чудову ефективність видалення, великі об'єми обробленої води призводять до скидання мікропластику у стічні води з очисних споруд щодня [146].

Також було припущено, що тип мікропластику відіграє певну роль у ефективності видалення під час очищення стічних вод, причому первинний мікропластик видаляються успішніше, ніж вторинний мікропластик, оскільки

перші часто присутні у вигляді мікрокульок, тоді як другі, швидше за все, є текстильними волокнами чи іншим сміттям. [147].

Розділення на основі феррорідини

Магнітна екстракція була застосована для видалення мікропластику зі стічних вод [117], і новизна цього підходу полягає в тому, що при роботі з мікропластиком малого розміру ефективність екстракції була вищою, оскільки більше наночастинок Fe могло зв'язуватися з одиницею маси пластику.

Прогресом цієї технології є наноферофлуїди, які є колоїдними композиціями, що містять однодоменні магнітні наночастинок в рідкому носії [148]. Цей підхід привернув увагу промислових та академічних наукових спільнот протягом останніх кількох десятиліть завдяки великій площі поверхні наночастинок, які можуть ефективно зв'язувати забруднювачі.

Рецептура залученої рідини була протестована двома незалежними авторами шляхом змішування мастила та FA для модифікації наночастинок заліза. Модифікований FA з наночастинками заліза за допомогою методу співосадження для видалення нанопластики ПС зі стічних вод як нового екологічно чистого адсорбенту. Спостерігалася сильна взаємодія між наночастинками модифікованого Fe FA та PS, що підкреслює можливість повторного використання цих нових магнітних матеріалів до чотирьох разів [149]. Однак цей метод був випробуваний лише для наночастинок поліетилену, а випробування для мікропластику ще потрібно провести [149]. Так само випробували чотири типи олії (кулінарну олію, відпрацьовану кулінарну олію, мастильну олію та відпрацьовану мастильну олію) для виробництва ферорідини для ізоляції мікропластику від сірої води. Ці випробування базувалися на гіпотезі, згідно з якою нафта може затримувати весь мікропластик, магнетит може видалити значну кількість мікропластику, зважених у воді. Результати показали, що виробництво ферофлуїду з використанням мастила призвело до максимальної ефективності екстракції мікропластику (99% PET видалено з

синтетичної WW і 64% PET видалено з сірої води), і цей результат пов'язаний зі стабільними властивостями цієї комплексної суміші вуглеводнів. [150]. Цей метод потребує подальшої валідації, оскільки розмір PET становив 2 мм, і, таким чином, подальші випробування мають залучати мікропластик меншого розміру.

Фотокаталітичні мікромотори

Мікродвигуни — це мініатюрні самохідні машини, які привернули інтерес науковців у всьому світі завдяки їх застосуванню для видалення нафти, видалення металу/металоїдів і деградації органічних речовин. Було продемонстровано надійне фотокаталітичне видалення PS MP зі стічних вод за допомогою мікромотора на основі золота на основі TiO_2 під УФ-світлом [151]. Оскільки вони є фотокаталітичними, ці мікромотори можуть рухатися у воді завдяки фотокаталітичним реакціям на частинках, таким чином не потребуючи палива.

Були досліджені додаткові методи, включаючи використання біоінспірованих молекул (що складаються з каркаса органічних і неорганічних молекул) для видалення MP. Це передбачає блок включення; біоінспірований компонент, функціоналізований алкоксисилилом; блок захоплення для захоплення мікропластику і нанопластику у блоці включення на основі гідрофобної та Ван-дер-Ваальсової взаємодії; і піщаний фільтраційний пристрій для видалення захоплених мікро- та нанопластиків. Оскільки експериментальна робота над цією технологією не проводилась, цьому методу бракує практичності; однак у майбутньому можна розглянути можливість використання цієї адаптивної системи «господар-гість» для захисту фільтраційних мембран від мікро- та нанопластику [152].

4.3. Вплив мікропластику на екосистеми, людей та тварин

Відповідно до комплексного огляду наукових доказів, опублікованого Механізмом наукових консультацій Європейського Союзу в 2019 році, «мало відомо про ризики нано- та мікропластику для здоров'я людини, і те, що відомо, оточене значною невизначеністю». Автори огляду визначають основні обмеження як якість або методологія дослідження на сьогоднішній день. Оскільки «отрута в дозі», в огляді робиться висновок, що «існує необхідність зрозуміти потенційні форми токсичності для різних комбінацій NMP розміру-форми-типу в ретельно відібраних моделях людей, перш ніж робити надійні висновки щодо «реальних» ризиків для людини. можна зробити» [153].

Різні типи пластику мають різну токсичність, за словами Ашока Дешпанде, доктора філософії, хіміка-дослідника Північно-Східного наукового центру рибальства Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) у Сенді-Гук, штат Нью-Джерсі [2]. А різні полімери різною мірою накопичують різні забруднення. Пластик також накопичує бактерії, віруси, хімічні речовини та шкідливі водорості. Вчені побоюються, що кумулятивне накопичення цих токсинів може вплинути на здоров'я живих організмів. Проте дослідники не впевнені щодо обсягу мікропластику, який організм може витримати, або шкоди, яку він може завдати.

Мало того, що тварини та рослини ковтають мікропластик, деякі мікроби також живуть на поверхні мікропластику. Ця спільнота мікробів утворює слизьку біоплівку, яка, згідно з дослідженням 2019 року [154], має унікальну структуру та становить особливий ризик, оскільки було доведено, що мікропластикові біоплівки забезпечують нове середовище існування для колонізації, що збільшує перекриття між різними видами, таким чином, поширення патогенів і генів, стійких до антибіотиків, шляхом горизонтального перенесення генів. Потім, завдяки швидкому переміщенню водними шляхами, ці патогени можуть бути дуже швидко переміщені з місця їх походження в інше

місце, де конкретний патоген може не бути природним шляхом, поширюючи потенційну хворобу [154].

Люди і природа зазнають великої кількості токсичних хімічних речовин та мікропластику. Люди зазнають через вдихання, ковтання та безпосередній контакт зі шкірою впродовж усього життєвого циклу пластику. Наслідки використання мікропластику ще до кінця не вивчені. Зрозуміти їх вплив дуже складно через різні фізико-хімічні властивості, які роблять мікропластик багатогранним фактором стресу.

Якщо, з одного боку, мікропластик переносить токсичні хімічні речовини в екосистемах, таким чином слугуючи транспортними засобами, з іншого боку, він сам є коктейлем небезпечних хімічних речовин, які добровільно додаються під час їх виробництва як добавки для підвищення властивостей полімерів та продовжити їм життя.

Що поганого в невеликій кількості пластику? Точаться бурхливі дискусії та дослідження про те, наскільки мікропластик небезпечний для людей, тварин і навколишнього середовища. Головним чином через свій невеликий розмір (≤ 5 мм) мікропластик становить загрозу для тварин і навколишнього середовища, оскільки він доступний багатьом організмам і зберігається та вживається, наприклад, у їжу. Крім того, кожна мікрочастинка пластику має індивідуальний склад завдяки попереднім процесам виробництва, використання та розпаду. Надзвичайно шкідливі мікрозабруднювачі, такі як залишки пластифікаторів, важких металів, ПФОС або фармацевтичних препаратів, можуть прилипати до мікропластику. Це підвищує ризик фізичної та токсикологічної шкоди організмам та екосистемам, спричиненої мікропластиком [155].

Негативний вплив на організми, які піддаються впливу мікропластику, можна розділити на дві категорії: *фізичний вплив* і *хімічний вплив*. Перше пов'язане з розміром частинок, формою та концентрацією мікропластику, а друге — з небезпечними хімічними речовинами, пов'язаними з мікропластиком. Хоча дані про рівні впливу мікропластику на навколишнє

середовище та організми стрімко зросли за останні десятиліття, доступна обмежена інформація про хімічні речовини, пов'язані з мікропластиком. Мікропластик може містити два типи хімічних речовин: добавки та полімерну сировину (наприклад, мономері або олігомери), що походять із пластику, і хімічні речовини, поглинені з навколишнього середовища. Багато речовин, які класифікуються як небезпечні відповідно до постанови ЄС щодо класифікації та маркування, присутні в повсякденних продуктах як звичайні інгредієнти.

Близькість до густонаселених районів і неналежне поводження з відходами призводять до особливо високих рівнів забруднення. Точкові джерела, такі як очисні споруди або виробництво пластмас, також є важливими факторами впливу. Крім того, на забруднення мікропластиком впливають процеси транспортування, такі як вітер, водні течії, припливи та відпливи та поверхневий стік від дощу.

Загалом лімнічні екосистеми сильніше забруднені мікропластиком, ніж морські екосистеми, оскільки мікропластик може поширюватися ширше у величезному обсязі морських екосистем. Пластик і мікропластик накопичуються в так званих «сміттєвих плямах» через збіжні океанські течії.

Вчені з Університету Массачусетсу спільно з колегами з Шаньдунського університету в Китаї вивчили поведінку мікропластика в ґрунті й з'ясували, що він засвоюється і накопичується в рослинах. За словами вчених, результати дослідження дають прямі докази того, що нанопластинки можуть накопичуватися в рослинах. Цей процес може мати як прямі екологічні наслідки, так і непрямі, у вигляді небезпечних харчових продуктів. Повсюдне використання пластику призводить до величезної кількості пластикових відходів. Наші експерименти доводять, що поглинання і накопичення нанопластів відбувається у рослин на тканинному і молекулярному рівнях.

Баошан Сін зазначає, що нанопластичні частинки можуть бути такими ж маленькими, як білок або вірус. Вивітрювання і руйнування змінюють фізичні і хімічні властивості пластику, надають йому поверхневі заряди. Тому частинки

навколишнього середовища відрізняються від незайманих полістирольних нанопластів, часто використовуваних в лабораторії.

Для того, щоб підтвердити або спростувати гіпотезу, вчені вирощували рослини роду резуховидка — арабідопсис в ґрунті, змішаної з нанозопластами, які мали різні заряди. Це було потрібно, щоб в результаті оцінити масу рослин, їх зростання, вміст хлорофілу і ріст коренів. Через сім тижнів з'ясувалося, що біомаса і висота рослин, що зазнали впливу нанопластів, була нижчою. Це означає, що нанопласти скоротили загальну біомасу рослин. В результаті, у таких рослин зменшилася біомаса, це відіб'ється на врожаї і поживної цінності плодів.

Оскільки пластик розкладається повільно (часто протягом сотень або тисяч років), [156-157] мікропластик має високу ймовірність проковтування, включення та накопичення в тілах і тканинах багатьох організмів. Токсичні хімічні речовини, які надходять як з океану, так і зі стоком, також можуть підвищувати біопотужність харчового ланцюга [158][159]. У наземних екосистемах було продемонстровано, що мікропластик знижує життєздатність ґрунтових екосистем і зменшує вагу дощових черв'яків [160][161]. Цикл і переміщення мікропластику в навколишньому середовищі не повністю відомі, але наразі проводяться дослідження, щоб дослідити це явище. Дослідження глибоких шарів океанських відкладень у Китаї (2020) показують наявність пластику в шарах відкладень, набагато давніших за винайдення пластику, що призводить до недооцінки мікропластику під час досліджень поверхні океану [162]. Мікропластик також був знайдений у високих горах, на великих відстанях від його джерела [163]. Мікропластик також був виявлений у крові людини, хоча його вплив майже невідомий [164-165].

Крихітні шматочки пластику були виявлені в крижаних шматках, пробурених в Арктиці групою вчених під керівництвом США, що підкреслює загрозу зростаючих темпів забруднення Світового океану навіть у найвіддаленіших водах планети, передає Reuters.

Дослідники використали вертоліт, щоб приземлитися на кригу і отримати зразки під час 18-денної криголамної експедиції через Північно-Західний коридор – маршрут, який з'єднує Тихий та Атлантичний океани. Вчені взяли зразки криги з ізольованої ділянки води в канадській Арктиці, яка, як вони припускали, може бути відносно захищена від дрейфуючого пластикового забруднення.

В ході вивчення 18 крижаних зразків довжиною до 2 м з чотирьох різних місць Ланкастер Саунда вчені виявили пластикові кульки і нитки різних розмірів і форм. За словами океанографа з Університету Род-Айленда і наукового керівника експедиції Брайса Луз, дослідників вразила кількість подібних предметів, закутих у лід. За оцінкою вчених, взяті зразки льоду утворилися як мінімум рік тому і спочатку перебували в центральних районах Арктики.

На початку 2019 року дослідники виявили пластикові відходи в Маріанській западині в Тихому океані, яка є найглибшим місцем на Землі.

Вважається, що нанопластики становлять небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я людини. Завдяки своєму малому розміру нанопластики можуть перетинати клітинні мембрани та впливати на функціонування клітин. Нанопластики є ліпофільними, і моделі показують, що поліетиленові нанопластики можуть бути включені в гідрофобне ядро ліпідних подвійних шарів [77].

Токсичність речовини — це її здатність викликати шкідливі наслідки. Ці ефекти можуть вражати окрему клітину, групу клітин, систему органів або весь організм. Хімічні речовини, які вважаються найбільш шкідливими, це ті, які викликають рак, мутації ДНК, мають токсичний репродуктивний ефект, стійкі до навколишнього середовища, здатні накопичуватися в харчовому ланцюзі чи організмі та мають інші шкідливі властивості, такі як порушення гормонів. Внутрішніми органами, які найчастіше уражаються, є печінка, нирки, серце, нервова система (включаючи мозок) і репродуктивна система.

Багато з хімічних речовин, які зазвичай використовуються для виготовлення пластмас, є небезпечними. Доведено, що бісфенол А (BPA), фталати, а також деякі бромовані антипірени, які використовуються для виготовлення побутових товарів і упаковки харчових продуктів, є ендокринними руйнівниками, які можуть завдати шкоди здоров'ю людини при попаданні всередину або вдиханні.

Хімічні речовини, що порушують роботу ендокринної системи, визначені як речовини, які є екзогенними для організму людини або тварини, мають гормональну активність, яка змінює гомеостаз ендокринної системи, тому вони викликають особливе занепокоєння. Ці сполуки перешкоджають розвитку ендокринної системи та впливають на функціонування органів, які реагують на гормональні сигнали. Ендокринні та репродуктивні ефекти ендокринних руйнівників можуть бути наслідком їхньої здатності:

- а) імітувати природні гормони;
- б) антагонізувати їхню дію;
- в) змінювати структуру їх синтезу та метаболізму;
- г) модифікувати вирази специфічні рецептори.

Сучасна наука пов'язує це з різними захворюваннями та станами, такими як гормональний рак (молочної залози, передміхурової залози, яєчок), репродуктивними проблемами (вади розвитку статевих органів, безпліддя), метаболічними розладами (діабет, ожиріння), астмою та розладами нервової системи (розлади навчання, аутизм), що графічне представлено на рис. 4.2.

Поряд із уже наведеними науковими доказами існує занепокоєння через зростання рівня багатьох захворювань у Європі та в усьому світі. Крім того, громадськість широко піддається впливу цих хімічних речовин з різних джерел.

Середнє споживання мікропластику людьми знаходиться на рівнях, які вважаються безпечними для людей однак деякі особи іноді можуть перевищувати ці межі; наслідки цього, якщо такі є, невідомі [153]. Невідомо, чи і в якій мірі мікропластик біоакумулюється в організмі людини [166-167].

Дослідження, проведені в 2022 році, вперше виявили наявність полімерів у крові людини у 17 із 22 здорових добровольців. Середнє значення сумарної кількісно визначеної концентрації пластикових частинок становило 1,6 мг/л. Заявленою метою дослідження було розробити метод відбору проб і аналізу, який можна було б використовувати для виявлення пластику в крові людини [165].

Захворювання та стани

Що спричиняють хімічні речовини, які зазвичай використовуються для виготовлення пластмас, які порушують роботу ендокринної системи

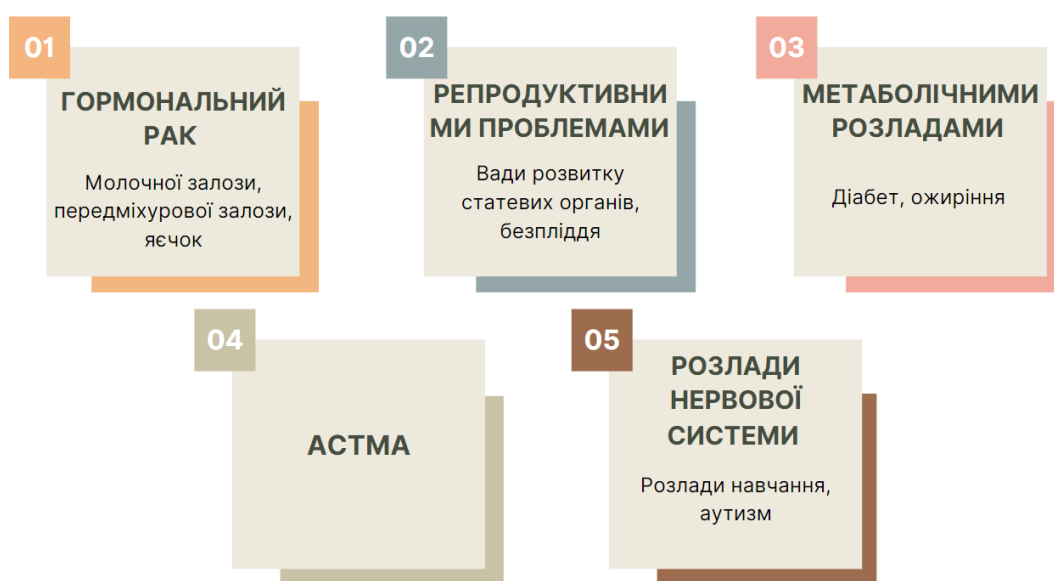


Рис. 4.2 - Захворювання та стани, що спричиняють хімічні речовини, які зазвичай використовуються для виготовлення пластмас, які порушують роботу ендокринної системи

Дослідники виявили, що мікропластик (частинки пластику розміром від 100 нанометрів до п'яти мікрометрів у діаметрі) внаслідок старіння під дією ультрафіолетового спектру, має велику поверхневу площу та хімічні речовини пошкоджують клітинні оболонки бактерій. Вона затримує мікроби та сприяє їх контакту. Цю роботу проводили вчені з Інженерної школи ім. Джорджа Р. Брауна при Університеті Райса разом із колегами з Китаю та Х'юстонського університету. Дослідження, опубліковані у Journal of Hazardous Materials. А це

призводить до горизонтального обміну генетичною інформацією. Особливістю цього процесу є обмін генами між різними видами та навіть типами бактерій. Професор цивільної та екологічної інженерії університету Джорджа Брауна, директор Центру очищення води із застосуванням нанотехнологій доктор Педро Альварес з його командою були здивовані, виявивши, що мікропластичне старіння посилює горизонтальне перенесення генів стійкості до антибіотиків. Підвищене поширення стійкості до антибіотиків — це ігнорування потенційного впливу мікропластичного забруднення.

Згідно з дослідженням, ця синергія може значно прискорити адаптацію бактерій до антибіотиків навіть без зіткнення з ними. Це може значно знизити ефективність лікування антибіотиками та здатність організму людини боротися з інфекціями.

Дослідники також відзначили високий рівень перфтороктанової кислоти (ПФОК) у молодих людей. ПФОК є надзвичайно стійкою і досить токсичною речовиною, легко накопичується у тканинах. Він, як правило, використовується в процесі виготовлення тefлону, який застосовують для виготовлення антипригарного посуду і водонепроникного одягу.

Є деякі докази того, що мікропластик завдає шкоди водним мешканцям. Риби часто приймають частинки пластику за їжу. Коли вони їдять пластик, він може блокувати травний тракт, який потім посиляє неправильні сигнали про голод в мозок тварин. Черепаха може померти, з'ївши поліетиленовий пакет, але дрібніші частинки накопичуються в травній системі, не вбиваючи тварину. Деякі інші мікропластики потрапляють у харчовий ланцюг, коли люди їдять рибу чи морепродукти.

Коли тварини, навантажені мікропластиком, споживаються хижаками, мікропластик потім вбудовується в тіла людей, що живуть на вищому трофічному рівні, що представлено на рис. 4.3. Наприклад, вчені повідомили про накопичення пластику в шлунках риб-ліхтариків, які є маленькими фільтраторами і є основною здобиччю для промислових риб, таких як тунець і

риба-меч [168]. Мікропластик також поглинає хімічні забруднювачі, які можуть потрапити в тканини організму [169]. Маленькі тварини піддаються ризику скорочення споживання їжі через хибне насичення та, як наслідок, голодування чи іншу фізичну шкоду від мікропластику.

Показано також, що нанопластики проникають через епітеліальну мембрану риб, накопичуючись у різних органах, включаючи жовчний міхур, підшлункову залозу та мозок [170-171]. У рибок даніо полістирольна нанопластика може викликати шлях реакції на стрес, змінюючи рівні глюкози та кортизолу, що потенційно пов'язане зі змінами поведінки у фазах стресу. У дафнії полістирольний нанопластик може потрапляти всередину прісноводної кладоцери *Daphnia pulex* і впливати на її ріст і розмноження, а також викликати захист від стресу, включаючи виробництво АФК і MAPK-HIF-1/NF-κB-опосередковану антиоксидантну систему [172-175].

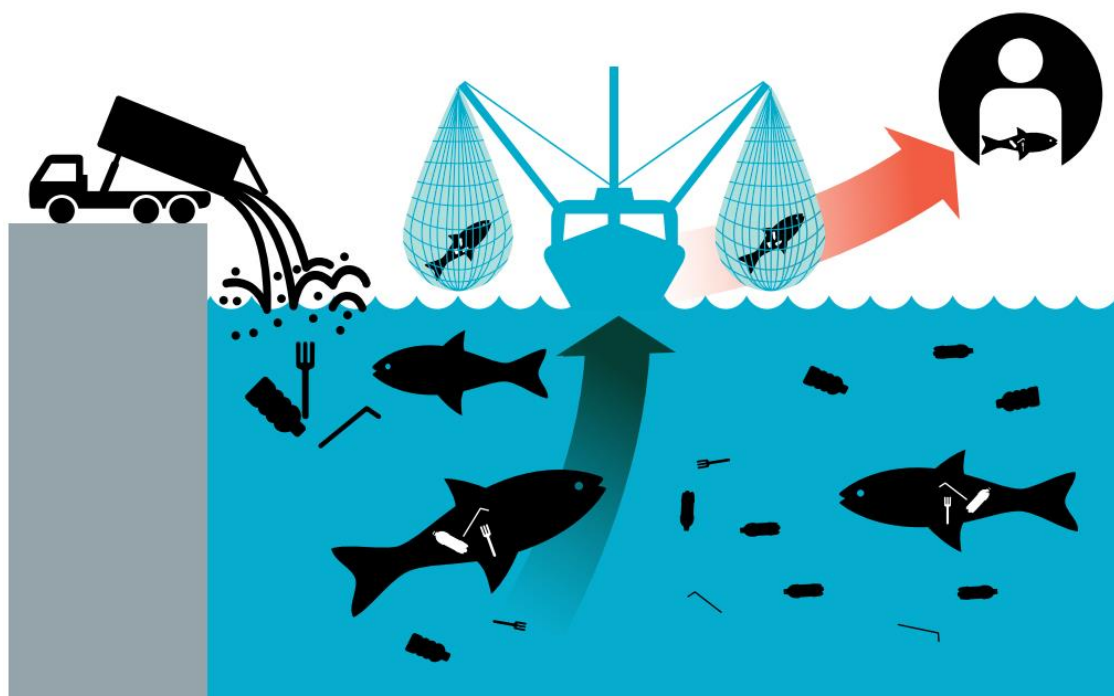


Рис. 4.3 - Колообіг пластику

Згідно з дослідженням, у якому Ашока Дешпанде, доктора філософії, хімік-дослідник Північно-східного наукового центру рибальства Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) у Сенді-Гук, штат

Нью-Джерсі, брав участь 15 років тому, забруднюючі речовини в рибі біля Сенді Хука перевірялися в межах допустимих рівнів Управління з контролю за продуктами й ліками США. Але це було 15 років тому.

Мікропластик може потрапляти в тканини тварин через ковтання або дихання. Було показано, що в шлунково-кишковому тракті різних видів кільчастих черв'яків, таких як черв'яки, що живляться відкладеннями (*Arenicola marina*), є мікропластики. Було помічено, що багато ракоподібних, як-от береговий краб *Carcinus maenas*, інтегрують мікропластик у свої дихальні та травні тракти [107, 174, 176]. Частинки пластику риби часто приймають за їжу, яка може блокувати їхній травний тракт, надсилаючи неправильні сигнали про харчування в мозок тварин [15]. Однак нові дослідження показали, що риби ковтають мікропластик ненавмисно, а не навмисно [177].

Дослідження, проведене на аргентинському узбережжі гирла Ріо-де-ла-Плата, виявило наявність мікропластику в кишечнику 11 видів прибережних прісноводних риб. Ці 11 видів риб представлені чотирма різними способами харчування: детритоїдні, планктивні, всеїдні та іхтіофаги [178]. Це одне з небагатьох на сьогоднішній день досліджень, які показали, що прісноводні організми поглинають мікропластик.

Донні живильники, такі як бентосні морські огірки, які є невибілковими падальщиками, які харчуються сміттям на дні океану, поглинають велику кількість осаду. Було показано, що чотири види морських огірків (*Thyonella gemmate*, *Holothuria floridana*, *H. grisea* та *Cucumaria frondosa*) проковтнули від 2 до 20 разів більше фрагментів ПВХ і від 2 до 138 разів більше фрагментів нейлонової нитки (аж 517 волокон на організм) на основі співвідношення пластику до піску після кожної обробки осаду. Ці результати свідчать про те, що люди можуть вибірково ковтати частинки пластику. Це суперечить прийнятій стратегії невибіркового годування морських огірків і може виникнути в усіх передбачуваних неселективних годівницях, коли вони містять мікропластик [179].

Було також показано, що двостулкові молюски, важливі водні фільтратори, поглинають мікропластик і нанопластик [180]. Під впливом мікропластику фільтраційна здатність двостулкових молюсків знижується [181]. У результаті виникають численні каскадні ефекти, такі як імунотоксичність і нейротоксичність [182-184]. Зниження імунної функції відбувається через зниження фагоцитозу та активності гена NF-κB [182][184]. Під впливом мікропластику двостулкові молюски також страждають окислювальним стресом, що вказує на порушення здатності детоксикувати сполуки в організмі, що в кінцевому підсумку може пошкодити ДНК [183]. Двостулкові гамети та личинки також пошкоджуються під впливом мікропластику. Частота затримок розвитку та вад розвитку збільшується, а частота запліднення знижується [180][185]. Коли двостулкові молюски піддавалися впливу мікропластику, а також інших забруднюючих речовин, таких як CO₂, ртуть або вуглеводні в лабораторних умовах, було показано, що токсичні ефекти посилюються [181-183].

Не лише риби та вільноживучі організми можуть ковтати мікропластик. У лабораторних умовах було показано, що склерактинові корали, які є основними рифобудівниками, поглинають мікропластик [186]. Корали, такі як *Porilloroga verrucosa*, поглинають мікропластик. [187] Для того, щоб мікропластик пройшов крізь тварину, може знадобитися до 14 днів (порівняно з 2-денним періодом нормального травлення), але заплутаність частинок у зябрах тварин може повністю запобігти виведенню [175]. Хоча вплив споживання на ці корали не досліджувався, корали легко піддаються стресу та знебарвлюються. Було показано, що мікропластик прилипає до зовнішньої поверхні коралів після впливу в лабораторії [186]. Прилипання до зовнішньої сторони коралів потенційно може бути шкідливим, оскільки корали не можуть впоратися з опадами або будь-якими твердими частинками на своїй зовнішній стороні та злущують їх, виділяючи слиз, витрачаючи на це енергію, збільшуючи ймовірність смертності [188].

У 2017 році морські біологи виявили, що три чверті підводної морської трави на атолі Турнеффе біля узбережжя Белізу містять мікропластикові волокна, осколки та намистини. Пластикові частини були зарослі епібіонтами (організмами, які природним чином прилипають до морської трави). Морська трава є частиною екосистеми бар'єрних рифів, нею живляться риби-папути, яких, у свою чергу, їдять люди. Ці висновки, опубліковані в *Marine Pollution Bulletin*, можуть бути «першим відкриттям мікропластику на водних судинних рослинах... [і] лише другим відкриттям мікропластику на морських рослинах у будь-якій точці світу» [189]. Постраждати можуть не лише водні тварини. Мікропластик може затримувати ріст наземних рослин і дощових черв'яків [190].

У 2019 році було зареєстровано перші європейські записи про мікропластикові предмети у вмісті шлунка амфібій у зразках звичайного європейського тритона (*Triturus carnifex*). Це також стало першим доказом в усьому світі, підкреслюючи, що нова проблема пластику є загрозою навіть у віддалених високогірних середовищах [191].

Зоопланктон поглинає мікропластикові кульки (1,7–30,6 мкм) і виділяє фекалії, забруднені мікропластиком. Поряд з ковтанням мікропластик прилипає до придатків і екзоскелету зоопланктону [192]. Зоопланктон, серед інших морських організмів, споживає мікропластик, оскільки він виділяє подібні інфохімічні речовини, зокрема диметилсульфід, як і фітопланктон [193-194]. Такі пластики, як поліетилен високої щільності (HDPE), поліетилен низької щільності (LDPE) і поліпропілен (PP), створюють запах диметилсульфіду [183]. Ці типи пластику зазвичай зустрічаються в поліетиленових пакетах, контейнерах для зберігання їжі та кришках від пляшок [195]. Зелені та червоні нитки пластику зустрічаються в планктонних організмах і морських водоростях [196].

Нещодавнє субхронічне дослідження досліджувало полімерні кульки на основі метакрилату (> 10 мкм) у харчових продуктах для терапевтичних цілей і

не виявило жодних ознак біонакопичення полімерних кульок в органах мишей, крім шлунково-кишкового тракту [197]. Мікропластик, який споживають риби та ракоподібні, може згодом споживатися людьми як кінець харчового ланцюга [198]. Однак потрапляння мікропластику з їжею може бути відносно незначним; наприклад, хоча відомо, що мідії накопичують мікропластик, прогнозується, що люди будуть піддаватися впливу більшої кількості мікропластику в домашньому пилу, ніж під час споживання мідій [199].

4.4. Заходи зі зменшення мікропластику у довкіллі. Переробка пластику

Переробка пластику — це переробка пластикових відходів на інші продукти. Переробка може зменшити залежність від звалищ, зберегти ресурси та захистити навколишнє середовище від забруднення пластиком і викидів парникових газів. Рівень переробки відстає від рівня інших відновлюваних матеріалів, таких як алюміній, скло та папір. До 2015 року у світі було вироблено близько 6,3 мільярдів тонн пластикових відходів, лише 9% з яких було перероблено, і лише ~1% було перероблено більше одного разу. Крім того, 12% було спалено, а решта 79% відправлено на звалище або в навколишнє середовище, включаючи океан (рис. 4.4) [66].

Не весь пластик піддається біологічному розкладанню та за відсутності переробки поширюється в навколишньому середовищі [67-68], де може завдати шкоди. Наприклад, станом на 2015 рік приблизно 8 мільйонів тонн пластикових відходів щорічно потрапляє в океани, завдаючи шкоди екосистемі та утворюючи океанські сміттєві плями [69] (рис. 4.5).

Майже вся переробка є механічною: плавлення та перетворення пластику на інші предмети. Це може спричинити деградацію полімеру на молекулярному рівні та потребує сортування відходів за кольором і типом полімеру перед переробкою, що є складним і дорогим. Помилки можуть призвести до того, що властивості матеріалу будуть непостійними, що зробить його непривабливим

для промисловості [70]. Під час переробки вихідної сировини відходи пластику перетворюються на вихідні хімічні речовини, які потім можуть стати свіжим пластиком. Це передбачає вищі енергетичні та капітальні витрати. Крім того, пластик можна спалити замість викопного палива. У деяких країнах це домінуюча форма утилізації пластикових відходів, особливо там, де відходять на звалища політики діють.

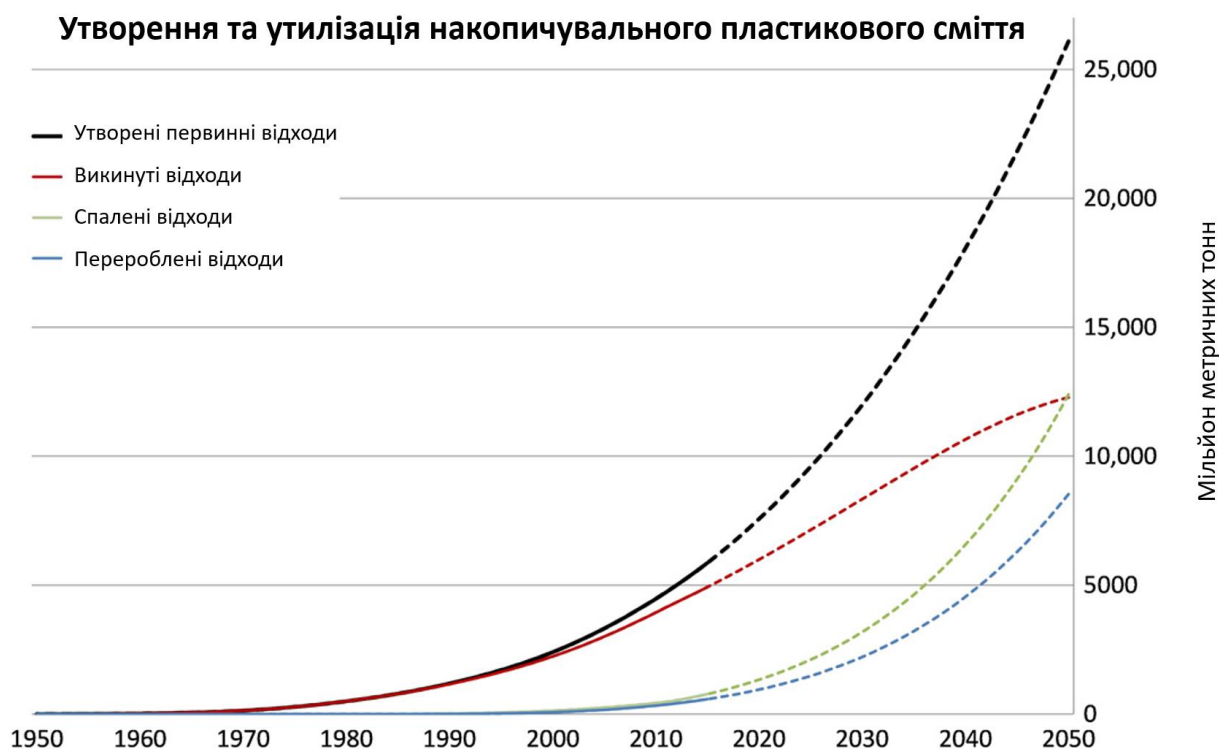


Рис. 4.4 Утворення та утилізація накопичуваного пластикового сміття

Переробка пластику займає низьке місце в ієрархії відходів. Його пропагували з початку 1970-х років, [71] але через економічні та технічні проблеми він не вплинув на пластикові відходи до кінця 1980-х років. Пластмасову промисловість критикували за лобіювання розширення програм переробки, навіть якщо дослідження показали, що більшість пластику не можна економічно переробити [72-73].

Загальна кількість пластику, виробленого в усьому світі до 2015 року, оцінюється в 8,3 мільярда тонн [66]. Приблизно 6,3 Бт з цього було викинуто як відходи, з яких близько 79% накопичувалося на звалищах або в природному

середовищі, 12% було спалено, а 9% було перероблено — лише ~1% усього пластику перероблявся більше одного разу [66]. Зовсім недавно, станом на 2017 рік, лише 9% із 9 мільярдів тонн виробленого пластику було перероблено [74].

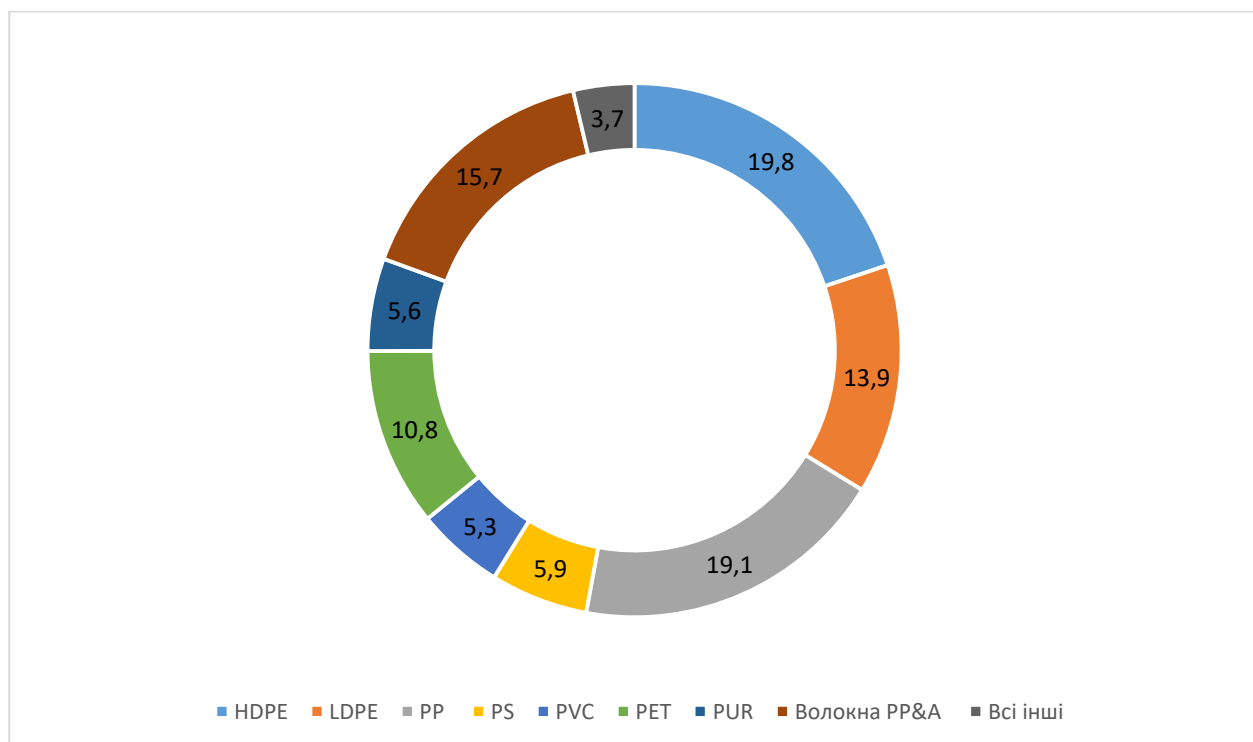


Рис. 4.5. Глобальні пластикові відходи за типом полімеру (2018)

До 2015 року світове виробництво досягло приблизно 381 млн. тонн на рік [66]. Рівень переробки того року становив 19,5%, тоді як 25,5% було спалено, а решта 55% утилізовано, переважно на звалище. Ці показники відстають від інших вторинних матеріалів, таких як папір, метал і скло. Хоча відсоток переробленого або спаленого матеріалу зростає з кожним роком, тоннаж відходів, що залишилися, також продовжує зростати (рис. 4.6). Виробництво може досягти ~800 Мт на рік до 2040 року, хоча впровадження всіх можливих заходів може зменшити забруднення пластиком на 40% порівняно з показниками 2016 року [75].

Багато пластикових виробів мають символи, що вказують на тип полімеру, з якого вони виготовлені. Ці ідентифікаційні коди смоли (RIC) використовуються в усьому світі [76]. Вони були розроблені в 1988 році Товариством індустрії пластмас (тепер Асоціація промисловості пластмас) у

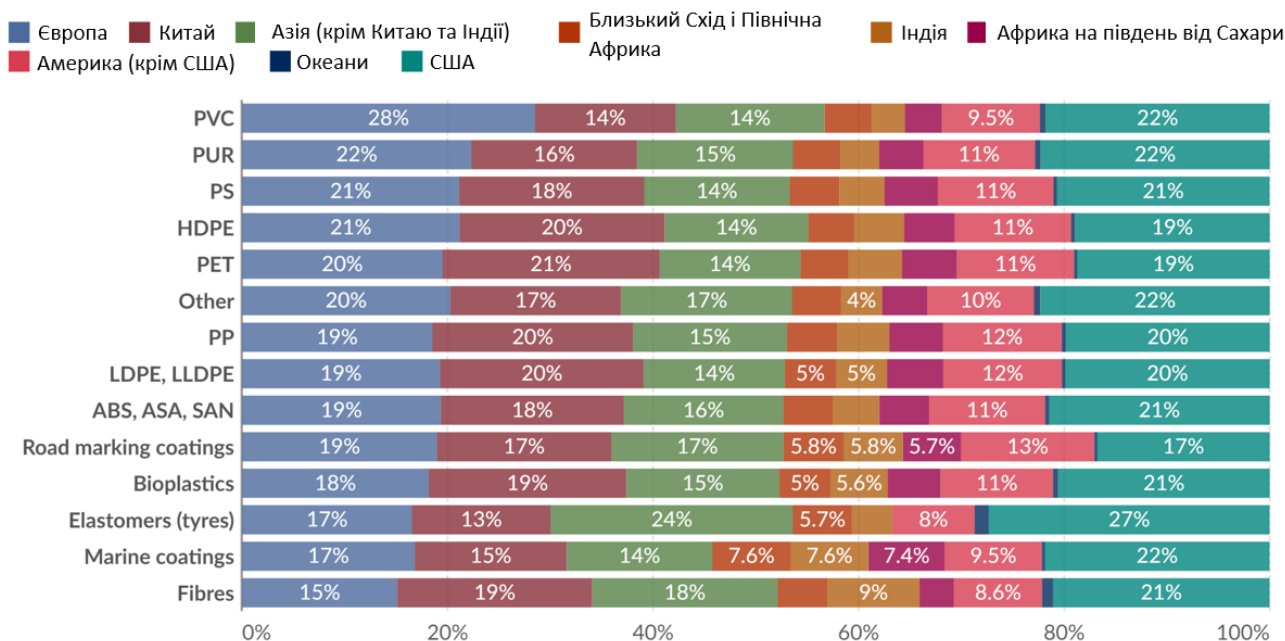
Сполучених Штатах, але з 2008 року ними керує організація зі стандартизації ASTM International [76].

RIC не є обов'язковими в усіх країнах, але багато виробників добровільно маркують свою продукцію. Більше половини штатів США прийняли закони, які вимагають ідентифікації пластикових виробів. Сім кодів включають шість для найпоширеніших пластикових товарів і один як універсальний. ЄС підтримує аналогічний список із дев'яти кодів, який також включає ABS та поліаміди. RIC засновані на символі переробки, але викликали критику, оскільки вони означають, що позначені предмети завжди підлягають переробці, хоча це може бути неправдою.

Утворення пластикових відходів за регіонами та полімерами, 2019



Типи полімерів наступні: акрилонітрил-бутадієн (AB), акрилонітрил-стирол-акрилат (ASA), стирол-акрилонітрил (SAN), поліуретан (PUR), полівінілхлорид (PVC), полістирол (PS), лінійний поліетилен низької щільності (LLDPE), Поліпропілен (ПП), поліетилентерефталат (PET), поліетилен високої щільності (HDPE).



Data source: OECD (2022)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Note: Regional aggregates were calculated by Our World in Data and are based on those specified by the OECD¹.

Рис. 4.6. Утворення пластикових відходів за регіонами та полімерами, 2019

RIC не особливо важливі для однопотокової переробки, оскільки ці операції все більше автоматизуються. Однак у деяких країнах громадяни

зобов'язані розділяти пластикове сміття за типом полімеру перед збором. Наприклад, в Японії PET-пляшки збираються окремо для переробки. Далі представлено таблиці 4.3 де вказано пластиковий ідентифікаційний код та певні властивості цього матеріалу.

Таблиця 4.3

Пластиковий ідентифікаційний код та певні властивості цього матеріалу

Пластиковий ідентифікаційний код	Вид пластичного полімеру	Властивості	Загальні програми	Температура плавлення та склування (°C)	Модуль Юнга (ГПа)
1	2	3	4	5	6
	Поліетилентерефталат (PET)	Прозорість, міцність, в'язкість, бар'єр для газу та вологи	Пляшки для безалкогольних напоїв, води та заправок для салатів; банки з арахісовим маслом і варенням; кришки від морозива; мала непромислова електроніка	$T_m = 250$; $T_g = 76$	2–2,7
	Поліетилен високої щільності (HDPE)	Жорсткість, міцність, в'язкість, бар'єр для газу та вологи	Водопровідні труби, газопроводи та пожежні трубопроводи,	$T_m = 130$; $T_g = -125$	0,8

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
			електричні та комунікаційні канали, п'ятигалонні відра, пляшки для молока, соку та води, пакети для продуктів, деякі пляшки для туалетних принадностей		
	Полівінілхлорид (ПВХ)	Універсальність, легкість змішування, міцність.	Стрейч-плівка для непродовольчих товарів, іноді блістерна упаковка. Застосування не для упаковки включає ізоляцію електричні кабелі, жорсткі труби та вінілові платівки.	$T_m = 240;$ $T_g = 85$	2,4–4,1

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
	Поліетилен низької щільності (LDPE)	Простота обробки; міцність; гнучкість; легкість пломбування; вологостійкість	пакети для заморожених продуктів; стиска ються пляшки, наприклад, мед, гірчиця; харчові плівки; гнучкі кришки контейнерів	$T_m = 120$; $T_g = -125$	0,17– 0,28
	Поліпропілен (PP)	Міцність; стійкість до тепла, хімічних речовин, жиру та масла; вологостійкість	Багаторазовий посуд для мікрохвильової печі або контейнери для виносу; кухонні й посуд; ємності від йогурту або маргерину; одноразові стакани і тарілки; кришки від пляшок безалкогольних напоїв.	$T_m = 173$; $T_g = -10$	1,5–2
	Полістирол (PS)	Універсальність, прозорість, стакани, легко	Картонні коробки для яєць; одноразові	$T_m = 240$ (тільки ізотактичн	3–3,5

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
		формується, легко спінюється	тарілки, підноси та столові прибори; пінопластові харчові контейнери; упаковка арахісу та прокла дка упаковки;	ий); $T_g = 100$ (атактични й та ізотактичн ий)	
	Інше (часто полікарбонат або ABS)	Залежить від полімерів або комбінації полімерів	Пляшки для напоїв, пляшечки для дитячого молока. Застосу вання полікарбонату поза упаковкою: компакт-диски, «небитке» скло, корпуси електронних пристроїв, лінзи (включаючи сонцезахисні окуляри), приладові панелі. [78]	Полікарбо нат: $T_m = 225$ $T_g = 145$;	Полікар бонат: 2,6;АБС- пластик: 2,3

Пластикові відходи складаються з різних видів полімерів [66][78]. Поліолефіни складають майже 50% усіх пластикових відходів, а понад 90% відходів складається з терморозм'якшувальних полімерів, які можна переплавити.

Багато видів пластику можна використовувати як джерело вуглецю (замість коксу) при переробці сталевих брухтів [79], причому щороку в Японії переробляється приблизно 200 000 тонн пластикових відходів [80].

Використання відновленої пластмаси в інженерних матеріалах набирає поширення [81]. Мелений пластик може використовуватися як будівельний заповнювач або наповнювач у певних сферах застосування [82]. Хоча загалом непридатний для конструкційного бетону, включення пластику в асфальтобетон (утворюючи прогумований асфальт), основу та перероблену ізоляцію може бути корисним [83]. Прикладом цього є будівництво пластикових доріг. Вони можуть бути виготовлені повністю з пластику або можуть містити значну кількість пластику. Ця практика популярна в Індії, яка до 2021 року побудувала близько 700 км (435 миль) автомагістралей [84]. Це може призвести до вимивання пластикових добавок у навколишнє середовище [85]. Тривають дослідження використання пластмас у різних формах у цементних матеріалах, таких як бетон. Досліджується ущільнення пластикових матеріалів, таких як PET і пластикові пакети, а потім їх використання для часткової заміни наповнювача та деполімеризації PET для використання в якості полімерного сполучного для покращення бетону [86-88].

Висновки до розділу

За останні шість десятиліть людство виробило понад 8,4 мільярда тонн пластику. Рівень виробництва пластику експоненціально зростає щороку з 1,5 млн. тонн у 1950 році до 359 млн. тонн у 2019 році, більшість з яких є одноразовими пластиками. Більшість з них зараз опинилася на звалищах або

безпосередньо в нашому природному середовищі. Насправді лише 9% пластику, який використовується сьогодні, переробляється. Щороку в наші океани потрапляє до 12 мільйонів тонн пластику.

Є три основні сфери потенційного занепокоєння щодо мікропластику: сам пластик може певним чином впливати на фізіологію людини, мікропластик може утворювати комплекси з важкими металами чи іншими хімічними сполуками в навколишньому середовищі та діяти як вектор для потрапляння їх в організм, і це можливо, мікропластик може служити переносником патогенів [191]. Поки що невідомо, чи становить «реальний» ризик для людини вплив мікропластику на рівнях, які є в навколишньому середовищі; дослідження цього питання триває.

При цьому пластик проникає в організм через цілком буденні речі – контейнери для зберігання продуктів, футляри для DVD, чеки, пакети із супермаркету, водогінні труби з ПВХ, килимове покриття, навіть іграшки та медичні прилади.

Зменшення кількості мікропластику у водоймах може призвести до зменшення кількості смертей і підвищення плодючості водних тварин в океанах. Це підвищить цінність рибальства та аквакультури, а також покращить здоров'я населення.

РОЗДІЛ V. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ МІКРОПЛАСТИКОМ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1. Економічні і соціальні аспекти забруднення довкілля пластиковими відходами

Проблема боротьби з пластиковим забрудненням в останні роки вийшла на перший план порядку денного захисту навколишнього середовища в багатьох країнах світу. Для цього існують вагомі підстави: за загальноприйнятими оцінками, вже близько 359 млн. тон році пластикових відходів накопичилися у навколишньому середовищі у 2019 році і темпи забруднення лише нарастають. При цьому виникають соціальні та економічні витрати на ліквідацію наслідків забруднення пластиком навколишнього природного середовища. Перелічимо деякі з них.

Соціальні наслідки. Глобальна вартість забруднення пластиком в океані оцінюється в 6-19 мільярдів доларів щорічно, впливаючи на туризм, рибальство та інші прибережні економіки.

Пластикове забруднення порушує традиційні методи рибальства та культурні церемонії для спільнот, що залежать від океану.

Хоча дослідження впливу на здоров'я людини продовжуються, мікропластик був виявлений у зразках людської крові та випорожнень.

Співтовариства, які залежать від морських ресурсів як засобу існування, стикаються з зростаючою загрозою пластикового забруднення, включаючи мікропластик. Рибальство, туризм та культурна практика страждають через загрозу пластикового сміття. морські екосистеми і підривають економічну стабільність. Вживання морепродуктів і питної води викликає серйозні проблеми зі здоров'ям населення, хоча точні наслідки для здоров'я залишаються предметом досліджень і дискусій. Проте потенційні ризики вимагають вживання превентивних заходів щодо охорони здоров'я населення.

Маргіналізовані спільноти, які часто розташовані поблизу забруднених водних шляхів або звалищ, несуть непропорційний тягар пластикового забруднення, посилюючи існуючу соціально-економічну нерівність та екологічну несправедливість.

Економічні витрати та збитки. Щорічна вартість прибирання пластикових відходів із пляжів у всьому світі становить 13 млрд доларів США.

Підраховано, що вартість відходів пластикової упаковки щорічно втрачається в період між 80 та 120 мільярдами доларів США, якраз на етапах сортування та обробки.

Вважається, що пластикове забруднення є причиною зниження на 1-5% послуг морських екосистем. За оцінками, 500 мільярдів доларів США втрачається щороку через скорочення. Це приблизно 33 000 доларів за кожен метричну тонну пластикових відходів.

Неприваблива присутність пластикового сміття на пляжах і в морському середовищі відштовхує туристів, що призводить до економічних втрат для прибережних угруповань, що залежать від доходів від туризму. Воно завдає шкоди популяціям риб та загрожує рибальським снастям, підриваючи життєздатність рибної промисловості та ставлячи під загрозу продовольчу безпеку вразливих груп населення.

Таким чином, можна сформулювати основні соціально-економічні наслідки забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами та мікропластиком (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1

Соціально-економічні наслідки забруднення навколишнього середовища відходами пластику і мікропластику

Наслідки	Пояснення
1	2
Вплив на екосистеми та біорозмаїття	Зниження продуктивності рибальства: Мікропластик спостерігається морськими

	організмами, що призводить до їх
--	----------------------------------

Продовження таблиці 5.1

1	2
	захворювань, зниження чисельності та якості улову. Це створює наслідки для рибальської галузі. Пошкодження екосистеми: забруднення харчових ланцюжків, загроза більшої стійкості природних ресурсів.
Витрати на очищення компонентів довкілля	- Муніципалітети та уряд виділяють значні кошти на очищення водойм, пляжів та територій від пластикового сміття. - Приватні компанії також несуть витрати, особливо у сфері туризму, де забруднення довкілля збільшує привабливість курортних зон.
Вплив на вартість господарської діяльності	- Попадання мікропластику в ґрунт та воду знижує родючість та якість сільськогосподарської продукції. - Додаткові витрати на фільтрацію та очищення води для іригації.
Витрати здоров'я населення	Мікропластик виявлений у продуктах харчування, питній воді та навіть на повітрі. Довгострокові наслідки його впливу на здоров'я людини поки не вивчені до кінця, але це може призвести до збільшення витрат на лікування.
Зниження довіри споживачів	Виявлення мікропластику в продуктах харчування (наприклад, рибі чи морепродуктах) знижує їхню привабливість, що відбивається на

	доходах компаній у кожній галузі.
--	-----------------------------------

Продовження таблиці 5.1

1	2
Регуляторні та податкові витрати	• Видалення пластикового забруднення накладає суттєвий фінансовий тягар на уряди та місцеві спільноти, відволікаючи ресурси від основних послуг та розвитку інфраструктури. У деяких країнах існує податок на неутилізований пластик • Посилення державного регулювання в галузі використання пластику змушує компанії інвестувати в екологічно чисті матеріали та технології

Економічні наслідки забруднення мікропластиком вимагають системного підключення та розвитку з боку уряду, бізнесу та суспільства для мінімізації наслідків. В даний час управління відходами націлене на зниження їх кількості та забезпечення того, що вироблені відходи перероблятимуться способами, що не призводять до деградації навколишнього середовища. Запобігання або мінімізація утворення відходів дозволяє економити кошти на проведення заходів щодо поводження з відходами, а також призводить до підвищення продуктивності та зниження питомого використання ресурсів. Життєвий цикл пластику значно перевищує його термін служби. Зменшення кількості відходів може бути досягнуто за рахунок вторинного використання матеріалів виробництва з відходів нових виробів. Саме тому на сьогоднішній день актуальним є питання розробки нових та модернізація старих способів утилізації [200-202].

5.2. Перехід до циркулярності використання пластику

До 2022 року склався широкий міжнародний суспільний консенсус, який підтримує державні органи, представники бізнесу та експертної спільноти, про необхідність боротьби з пластиковим забрудненням для усунення його негативного впливу на біосферу та життєве середовище людства. Відповіддю на цю проблему має стати створення так званої «циркулярної економіки пластиків» – концептуальної структури ринку, яка повністю замкнута на собі, що використовує як сировину для нових пластикових товарів продукти переробки відпрацьованих полімерних виробів (рис. 5.1).

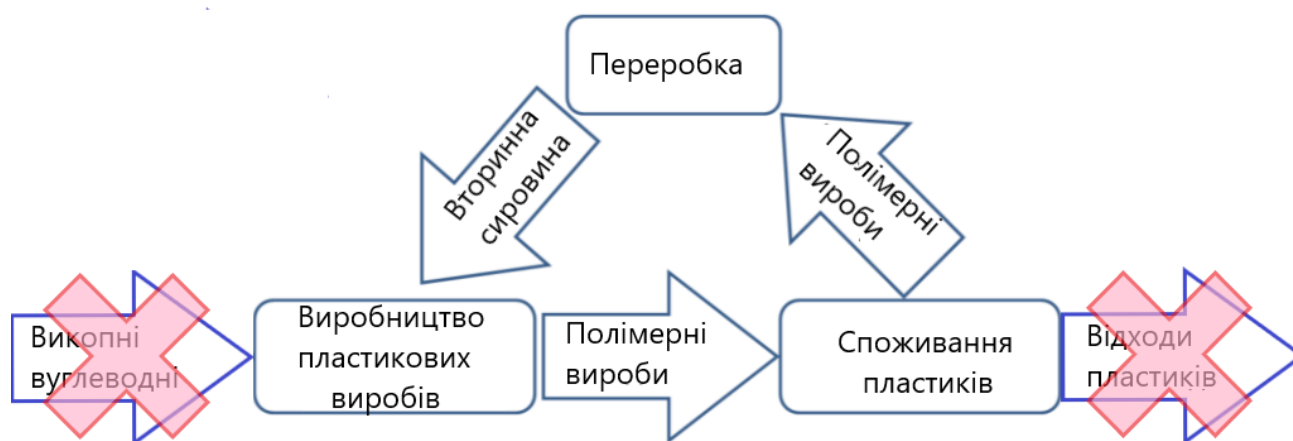


Рис. 5.1. Схема циркулярного підходу у використанні пластиків

Таким чином, реалізація принципів циркулярної економіки стає все більш важливим фактором розвитку ринку пластиків, причому на всіх ланках ланцюга: ініціативи і закони, що вже діють і плануються, зачіпають і формування попиту, і вимоги до виробництва, і питання утилізації відходів. Варто відзначити, що циркулярний підхід значимий не тільки в контексті самого ринку пластиків, а й потенційно може вплинути на світові ринки нафти і, відповідно, енергоносіїв загалом. Так, нафтохімічний сектор є другим за обсягами у структурі попиту нафтового ринку з часткою близько 10% і, за оцінками Міжнародної енергетичної агенції, вже в найближчому майбутньому

може залишитися єдиним сектором споживання з перспективами зростання. Враховуючи, що близько 90% випуску нафтохімічної галузі припадає на виробництво пластиків, саме розвиток ринку пластиків є практично визначальним для нафтохімічної галузі і, відповідно, відіграє важливу роль для нафтового ринку в цілому.

Застосування принципів циркулярної економіки при використанні пластиків стало офіційною метою державних політик Європейського Союзу, Японії, Південної Кореї, Канади. Власні концепції «циркуляризації» формують і великі компанії, причому як із боку виробників, і споживачів.

Найбільші світові виробники споживчих товарів в рамках стратегій сталого розвитку збільшують вміст вторинної сировини в пластикових упаковках та роблять упаковку придатною для повторного використання, переробки або компостування. Відсоток багаторазових пластикових упаковок варіюється від 0 до 4,3 %, найкращий результат в цій сфері належить компанії Danone (таблиця 5.2). Упаковки Coca-Cola на 99 % придатні для повторного використання чи переробки і мають вміст вторинної пластикової сировини – 9,7 %, також, високі показники представлені в компаній L'Oréal та Henkel.

Таблиця 5.2

Ключові показники поводження з пластиком найбільших виробників споживчих товарів у світі за 2020 р.

Компанія	Пластикова упаковка, яка придатна для повторного використання, переробки або компостування, %	Вміст вторинної сировини в пластиковій упаковці, %		Багаторазові пластикові упаковки, %	Загальний обсяг, тонн
		2020 рік	Ціль 2025 рік		
1	2	3	4	5	6
Nestlé	66	2	30	1	1 524 000

PepsiCo	79	4	25	0	2 300 000
---------	----	---	----	---	-----------

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4	5	6
Coca-Cola	99	9,7	25	3	2 981 421
Unilever	55	5	25	1	700 000
L'Oréal	30	6,9	50	1	137 280
Danone S. A	67	10,6	50	4,3	800 000
Henkel	55	8,5	30	1,6	361 000
Essity	56	0,5	25	0	62 927
Colgate-Palmolive	63	7	25	0	275 440

Найбільша питома вага у світових обсягах переробки пластикової упаковки у 2020 році припадає на виробництво одягу та взуття – 13,3 %, на другому місці галузь виробництва напоїв – 7,3 %, на третьому місці – косметична галузь (рис. 5.2).

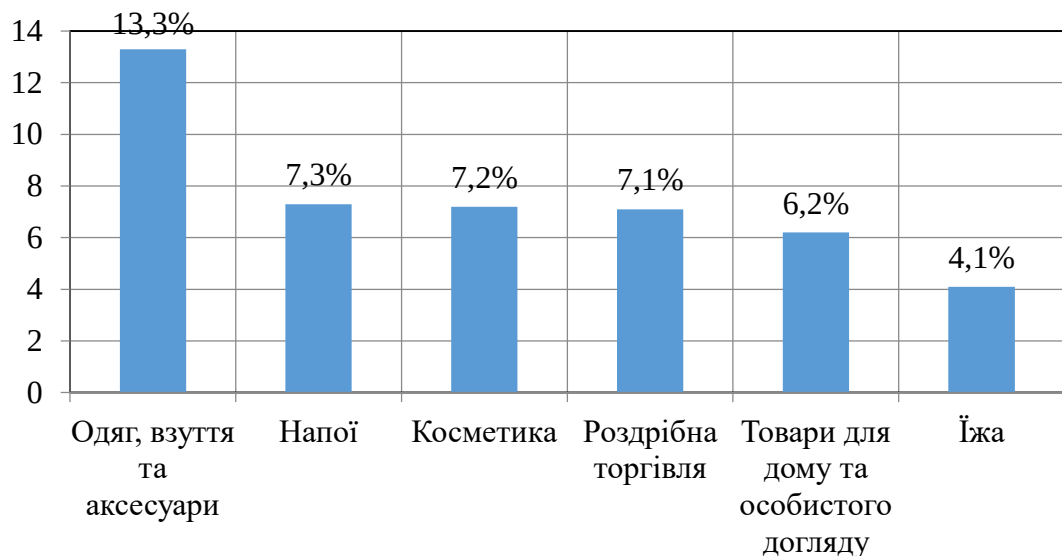


Рис. 5.2. Питома вага переробленої пластикової упаковки після споживання за секторами економіки у світі за 2020 р., %

2 липня 2019 року набула чинності Директива (ЄС) 2019/904 про зниження впливу деяких пластикових виробів на довкілля. Мета директиви – знизити вплив тих пластикових виробів, які особливо часто зустрічаються як відходи на європейських пляжах. Директива спрямована на захист навколишнього середовища та океанів від негативного впливу пластику та, зокрема, мікропластику. Вона також спрямована на скорочення споживання обмежених первинних ресурсів та на сприяння управлінню пластиком, орієнтованому на циклічність.

Наприклад, у Німеччині положення Директиви ЄС будуть перенесені до національного законодавства за допомогою поправки до Закону про упаковку, ухваленої Кабінетом міністрів Німеччини 20 січня 2021 року. Нові правила, які торкнуться, зокрема, виробників упаковки, дистриб'юторів та онлайн-маркетів, набули чинності з 2022 року. Суть поправок полягає у зобов'язанні використовувати багаторазові альтернативи в секторі Take-Out, мінімальній квоті переробленого пластику у пластикових пляшках та продовженні терміну дії обов'язкового депозиту. Для компаній цей перехідний етап несе у собі величезні проблеми, але й можливості.

З 1 січня 2025 року виробникам одноразових пластикових пляшок для напоїв, виготовлених переважно з поліетилентерефталату, буде дозволено продавати ці пляшки лише у тому випадку, якщо кожна з них складається щонайменше на 25 відсотків за масою з переробленого пластику. З 1 січня 2030 року ця квота збільшиться щонайменше до 30 відсотків, а потім поширюватиметься на всі пластикові пляшки одноразового використання.

Виробники можуть самі вирішувати, чи ця квота виконуватиметься на кожну пляшку або розподілятиметься на рік по відношенню до всього обсягу виробництва пляшок. Згідно з другим варіантом, тип і маса пластикової вторинної сировини, використаного виробником для виробництва пляшок, повинні бути задокументовані у формі, що піддається перевірці, так само як і

загальна кількість пластику, використаного для виробництва пляшок. Документація має бути надана на вимогу.

Ця нова постанова означає, що виробники одноразових пластикових пляшок для напоїв мають продемонструвати свою здатність до адаптації. Економічна система, здатна впоратися з цими та майбутніми проблемами, має бути заснована на принципі циркулярної економіки [203-206].

Висновки до розділу

Забруднення мікропластиком має значні економічні наслідки, які можуть вплинути на різні сектори економіки. Для вирішення цієї проблеми необхідний комплексний підхід, що включає як екологічні, так і економічні заходи. Впровадження економічних інструментів може стимулювати перехід до більш сталої економіки та зменшити негативний вплив мікропластику на навколишнє середовище.

Економічні наслідки забруднення мікропластиком

1. Витрати на очищення та утилізацію:

- Очищення водних ресурсів: Видалення мікропластику з водних об'єктів вимагає значних фінансових витрат на будівництво та експлуатацію очисних споруд, придбання фільтрів та реагентів.
- Утилізація пластикових відходів: Правильна утилізація пластикових відходів, включаючи мікропластик, також є дороговартісним процесом.
- Рекультивація забруднених територій: Очищення ґрунтів та інших середовищ від мікропластику є складним та дорогим завданням.

2. Втрати в сільському господарстві та рибальстві:

- Забруднення продуктів харчування: Накопичення мікропластику в продуктах харчування може призвести до значних економічних втрат через зниження їхньої якості та споживчого попиту.

- Зниження врожайності: Забруднення ґрунтів мікропластиком може негативно вплинути на врожайність сільськогосподарських культур.
- Зменшення популяцій риби та морепродуктів: Забруднення водних екосистем мікропластиком може призвести до зменшення популяцій риби та інших морських організмів, що має негативні наслідки для рибальства.

3. Втрати в туристичній галузі:

- Зниження привабливості туристичних зон: Забруднені пляжі та акваторії відштовхують туристів, що призводить до зменшення туристичних потоків та втрат доходів.
- Витрати на очищення пляжів: Видалення мікропластику з пляжів вимагає значних фінансових ресурсів.

4. Витрати на охорону здоров'я:

- Лікування захворювань, пов'язаних з мікропластиком: Можливі довгострокові наслідки впливу мікропластику на здоров'я людини можуть призвести до зростання витрат на охорону здоров'я.

5. Соціальні витрати:

- Втрата біорізноманіття: Забруднення мікропластиком призводить до втрати біорізноманіття, що має негативні соціальні наслідки.
- Вплив на здоров'я майбутніх поколінь: Накопичення мікропластику в довкіллі може мати негативні наслідки для здоров'я майбутніх поколінь.

Економічні інструменти для вирішення проблеми

Для вирішення проблеми забруднення мікропластиком можуть бути застосовані різноманітні економічні інструменти:

- Податки на пластикові вироби: Введення податків на одноразові пластикові вироби може стимулювати їх заміну на більш екологічні альтернативи.

- Субсидії для виробників екологічно чистих продуктів: Підтримка виробників екологічно чистих альтернатив пластику може сприяти їхньому розвитку.
- Системи депозитів за тару: Впровадження систем депозитів за тару може стимулювати збір та переробку пластикових відходів.
- Регулювання викидів мікропластику: Встановлення нормативів на викиди мікропластику в довкілля може змусити виробників шукати способи зменшення їхнього впливу.

РОЗДІЛ VI. ОХОРОНА ПРАЦІ У ОФІСІ

6.1. Охорона праці робітників в офісних кабінетах та розрахунок освітленості приміщення

Управління об'єктами має важливе значення в сучасних офісних умовах, оскільки допомагає забезпечити безпеку та здоров'я співробітників. Питання, пов'язані зі слабкими місцями управління об'єктами, такі як пошкодження об'єкта, структурні проблеми, проблеми з вентиляцією тощо, є предметами постійного занепокоєння. Тому методи безпеки та охорони здоров'я є важливими аспектами управління об'єктами для забезпечення того, щоб офіс завжди був безпечним та здоровим для співробітників.

У світі, що переживає швидку урбанізацію, ефективне управління об'єктами в міському середовищі стало центром занепокоєння. Безпека та здоров'я працівників тісно пов'язані з наглядом за цими приміщеннями, що є глобальною проблемою. У всьому світі організації стикаються з комплексним завданням підтримки та вдосконалення структури своїх робочих місць при забезпеченні добробуту своїх співробітників.

Цей глобальний контекст заклав основу для всебічного дослідження управління об'єктами на робочому місці, особливо з акцентом на фізичні фактори навколишнього середовища, такі як якість повітря в приміщенні, освітлення, рівень шуму, спека та чистота. Робочі місця в усьому світі стикаються з поширеними проблемами під час управління своїми об'єктами, включаючи серйозну проблему старіння інфраструктури. На багатьох робочих місцях розташовані старі будівлі, які потребують обслуговування та можуть становити загрозу безпеці. Процес реконструкції та омолодження цих конструкцій, враховуючи якість повітря в приміщенні, освітлення, рівень шуму та чистоту без спричинення збоїв, є значним викликом. Крім того, ще однією перешкодою, з якою стикається управління об'єктами, є обмеженість ресурсів,

оскільки бюджетні обмеження та дефіцит ресурсів часто перешкоджають підтримці чистого повітря, належного освітлення, прийняттого рівня шуму та загальної чистоти. Крім того, ефективне управління об'єктами на робочих місцях вимагає кваліфікованої та добре підготовленої робочої сили, особливо в питаннях, пов'язаних з якістю повітря в приміщеннях, освітленням, шумом і чистотою. Наявність кваліфікованого персоналу та постійного розвитку навичок є життєво важливими, особливо з огляду на розвиток законодавства про безпеку та гігієну на місцевому, національному та міжнародному рівнях.

Ефективне планування має вирішальне значення в управлінні об'єктами, особливо в аспектах безпеки та охорони здоров'я. Планування має надавати пріоритет превентивним заходам, а не коригувальним діям для мінімізації ризиків та підвищення безпеки. Це короткострокові (до 2 років), проміжні (2-5 років) і довгострокові (5-10 років) періоди планування. Короткострокове планування зосереджене на плановому технічному обслуговуванні та негайних заходах безпеки, забезпечуючи правильне та безпечне функціонування всіх систем та обладнання. Проміжне планування спрямоване на більш суттєві потреби в обслуговуванні та модернізації, готуючись до потенційних змін у регулюванні або впровадженні нових технологій. Довгострокове планування передбачає стратегічні інвестиції в інфраструктуру, передбачення майбутніх вимог безпеки та охорони здоров'я, а також забезпечення сталості практик управління об'єктами. Кожен етап планування повинен включати детальну оцінку ризиків, розподіл ресурсів та показники ефективності для моніторингу та оцінки ефективності впроваджених заходів.

Офісна робота зазвичай вважається професією з низьким рівнем ризику, але це не означає, що немає потенційної небезпеки. Насправді офісні працівники можуть мати низку проблем зі здоров'ям, зокрема:

1. Розлади опорно-рухового апарату (МСЗ). ЗМС – це пошкодження м'язів, сухожилів, зв'язок, нервів і кровоносних судин. Вони можуть бути спричинені повторюваними рухами, незручними позами та сильними

навантаженнями. Поширені МСЗ в офісних працівників включають синдром зап'ястного каналу, тендиніт і біль у спині.

2. Втома очей. Втома очей є поширеною проблемою для офісних працівників, які проводять довгі години, дивлячись на екран комп'ютера. Симптоми напруги очей включають головний біль, розмитість зору та сухість очей.

3. Стрес. Офісні працівники можуть відчувати стрес з різних джерел, включаючи вимоги роботи, терміни виконання та міжособистісні стосунки. Стрес може призвести до різноманітних проблем зі здоров'ям, включаючи тривогу, депресію та серцеві захворювання.

4. Травми внаслідок ковзання, спотикання та падінь. Офісні працівники можуть отримати травми внаслідок ковзання, спотикання та падінь на мокрій підлозі, нерівних поверхнях або захаращених доріжках.

5. Вплив небезпечних речовин. Офісні працівники можуть піддаватися впливу небезпечних речовин, таких як чистячі хімікати, тонер принтера та азбест.

Правильне освітлення приміщення відіграє ключову роль у створенні комфортного та функціонального простору. Воно впливає не тільки на наше сприйняття інтер'єру, але й на самопочуття та продуктивність. У цій статті ми розглянемо, як правильно розрахувати освітлення для різних типів приміщень, враховуючи їх призначення та особливості.

Перед тим, як приступити до розрахунків, важливо зрозуміти деякі ключові поняття та норми, які допоможуть у виборі оптимального рішення для освітлення.

Освітленість вимірюється в люксах (лк). Це величина, яка показує, як багато світла падає на певну поверхню. Для житлових приміщень рекомендована освітленість становить від 150 до 300 лк, тоді як для робочих зон це значення може бути вищим.

Коефіцієнт використання світла (КВС) – це показник, який враховує, скільки світла від загальної кількості, виробленого світильником, досягає робочої поверхні. Він залежить від розмірів приміщення, кольору стін, стелі, підлоги та від висоти установки світильників.

Розрахувати освітлення кімнати може бути дещо складно, але це точно можливо з правильною інформацією. Ось кілька методів, якими ви можете скористатися:

Метод кошторисної освітленості або метод квадратних метрів

Цей метод дозволяє розрахувати кількість світла, яка необхідна для приміщення, виходячи з його площі. Формула виглядає наступним чином:

$$E = N \cdot \frac{P}{S}, \quad (6.1)$$

де E – освітленість (лк), N – кількість ламп, P – потужність однієї лампи (лм), S – площа приміщення (м²).

Метод точкових розрахунків

Цей метод є більш складним і точним, оскільки враховує не тільки площу приміщення, але й висоту установки світильників, їх кількість та тип, а також коефіцієнт відбиття поверхонь. Він дозволяє отримати детальну карту освітленості для конкретного простору. Нижче, в таблиці 5.1 наведено рекомендовані нормами освітленості для різних типів приміщень.

Таблиця. 5.1

Рекомендовані норм освітленості

Тип приміщення	Освітленість (лк)
Житлова кімната	150-300
Кухня	200-500
Робочий кабінет	300-500
Ванна кімната	200-500

Розрахуємо освітленість приміщення в якому я проходила переддипломну навчально наукову практику, а саме кабінет служби охорони праці, промислової безпеки, охорони навколишнього середовища та цивільного захисту на підприємстві Миколаївської філії ТОВ «Газорозподільні мережі України» методом кошторисної освітленості або метод квадратних метрів:

- 1) Площа приміщення, м²:

$$S = 7,7 \cdot 5,5 = 42,35$$

- 2) Освітленість приміщення, лк:

$$E = 6 \cdot \frac{3240}{42,35} = 459,03$$

Як видно з розрахунків освітленість кабінету служби охорони праці, промислової безпеки, охорони навколишнього середовища та цивільного захисту на підприємстві Миколаївської філії ТОВ «Газорозподільні мережі України» є в межах норми робочого кабінету – 300-500.

Еквівалентне звукопоглинання – це важлива акустична характеристика приміщення, яка визначає, яка частина звукової енергії, що падає на поверхні приміщення, поглинається, а яка відбивається. Цей параметр має значний вплив на час реверберації та загальну акустичну якість приміщення.

Еквівалентне звукопоглинання характеризується **коефіцієнтом звукопоглинання α (альфа)**. Це безрозмірний коефіцієнт, який може приймати значення від 0 до 1 (рис. 6.1).

- **$\alpha = 0$:** Матеріал повністю відбиває звук (абсолютно тверда поверхня).
- **$\alpha = 1$:** Матеріал повністю поглинає звук (абсолютно поглинаюча поверхня).

Чинники, що впливають на еквівалентне звукопоглинання:

- Матеріал — різні матеріали мають різні коефіцієнти звукопоглинання. Наприклад, м'які пористі матеріали (мінеральна вата, пінопласт) зазвичай мають високий коефіцієнт звукопоглинання, а тверді поверхні (бетон, скло) – низький.

- Товщина матеріалу — чим більша товщина матеріалу, тим більше звуку він поглинає.
- Частота звуку — коефіцієнт звукопоглинання може змінюватися залежно від частоти звуку.
- Кут падіння звукової хвилі — коефіцієнт звукопоглинання може змінюватися залежно від кута, під яким звукова хвиля падає на поверхню.

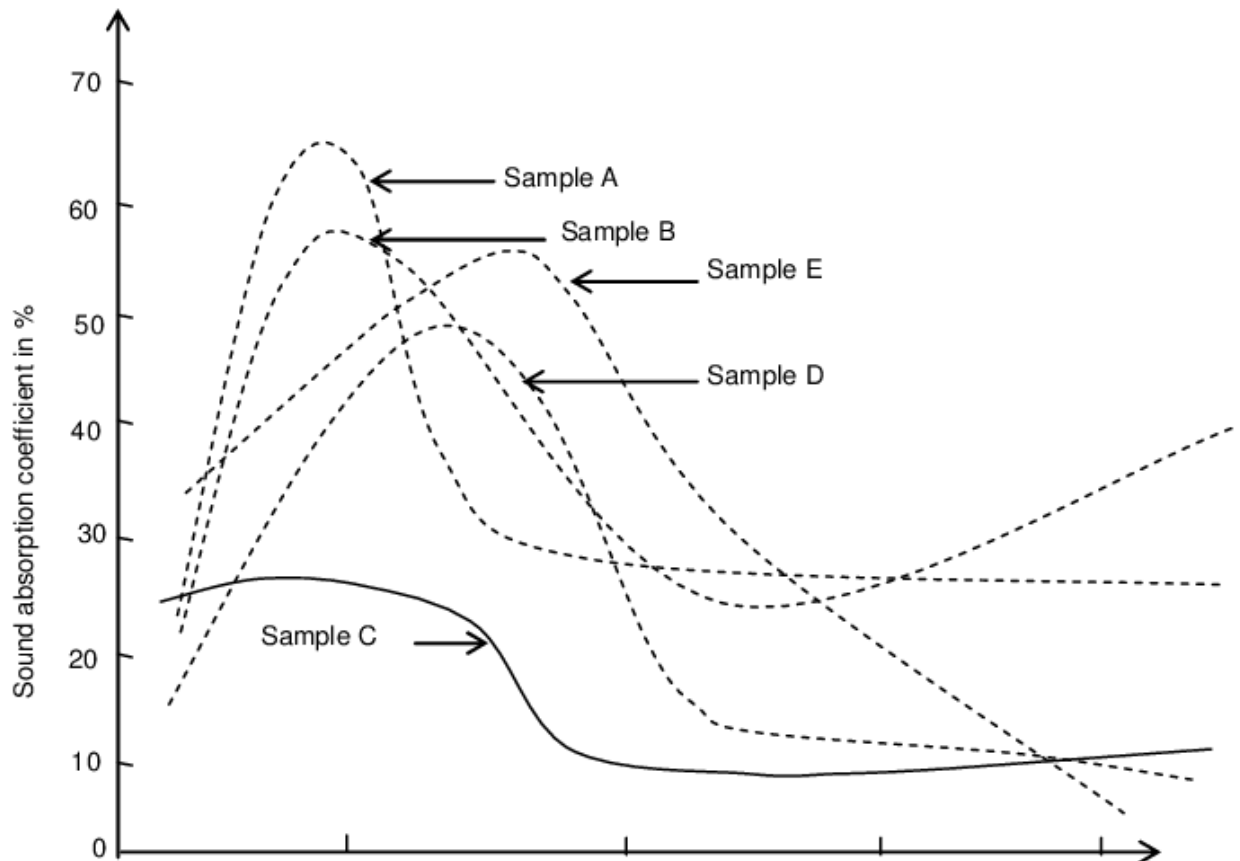


Рис. 6.1. Графік залежності коефіцієнта звукопоглинання від частоти в герцах

Величина еквівалентного звукопоглинання в приміщенні згідно з ДБН В.1.2-10-2008 Захист від шуму. Основні вимоги до будівель і споруд визначається в смугах частот за формулою:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T}, \quad (6.2)$$

де V – об'єм приміщення (м^3), T – час ревербації звуку в приміщенні (с).

Час реверберації – це важливий акустичний параметр, який характеризує тривалість звучання звуку в приміщенні після його припинення. Він безпосередньо впливає на якість звуку в кінотеатрах, концертних залах, студіях звукозапису та інших приміщеннях, де важлива чіткість і зрозумілість звучання. Для розрахунку часу реверберації використовують формулу Сабіна:

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \alpha}, \quad (6.3)$$

де V – об’єм приміщення (м^3), S – загальна площа поверхні приміщення (м^2), α – середній коефіцієнт звукопоглинання матеріалів, з яких виготовлені стіни, стеля, підлога та меблі.

Коефіцієнт звукопоглинання – це безрозмірний коефіцієнт, який показує, яка частина звукової енергії поглинається матеріалом при падінні на нього звукової хвилі.

Розрахунок величини еквівалентного звукопоглинання приміщенні в якому я проходила переддипломну навчально наукову практику, а саме кабінет служби охорони праці, промислової безпеки, охорони навколишнього середовища та цивільного захисту на підприємстві Миколаївської філії ТОВ «Газорозподільні мережі України»:

1) Час реверберації для приміщення:

- Об’єм приміщення, м^3 : $V = 7,7 \cdot 5,5 \cdot 2,3 = 97,405$
- Площа, м^2 : $S = 7,7 \cdot 5,5 = 42,35$
- Коефіцієнт звукопоглинання бетону, в октавних смугах із середньгеометричними частотами 4000 Гц: 0,04

$$T = \frac{0,161 \cdot 97,405}{42,35 \cdot 0,04} = 9,528$$

2) Величина еквівалентного звукопоглинання в приміщенні:

$$A = \frac{0,16 \cdot 97,405}{9,528} = 1,636$$

ВИСНОВКИ

За останні шість десятиліть людство виробило понад 8,4 мільярда тонн пластику. Рівень виробництва пластику експоненціально зростає щороку з 1,5 млн. тонн у 1950 році до 359 млн. тонн у 2019 році, більшість з яких є одноразовими пластиками. Більшість з них зараз опинилася на звалищах або безпосередньо в нашому природному середовищі. Насправді лише 9% пластику, який використовується сьогодні, переробляється. Щороку в наші океани потрапляє до 12 мільйонів тонн пластику.

Споживання мікропластику людьми наразі цілком очевидно. Точка проникнення може бути через ковтання (через заражену їжу або через трофічний шлях), через вдихання або через контакт зі шкірою. Після надходження мікропластику в організм людини його доля та наслідки залишаються суперечливими та недостатньо відомими. Тільки мікропластик розміром менше 20 мкм може проникати в органи, а мікропластик розміром близько 10 мкм може мати доступ до всіх органів, перетинати клітинні мембрани, перетинати гематоенцефалічний бар'єр і проникати в плаценту, припускаючи, що розподіл частинок у вторинних тканинах, таких як печінка, м'язи та мозок.

Європейський Союз (ЄС) взяв на себе провідну роль у вирішенні проблеми пластикового забруднення, визнаючи його шкідливий вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини. За останні роки було впроваджено кілька ключових законодавчих актів, які зосереджуються як на пластикових виробах загалом, так і на конкретній проблемі мікропластику такі, як Директива про одноразові пластики (SUPD), Регламент Комісії (ЄС) 2023/2055 та інші.

Україна ж перебувала в процесі розробки та впровадження законодавчих заходів для вирішення проблем, пов'язаних із пластиком і мікропластиком. В Україні діє загальне законодавство щодо поводження з відходами, яке охоплює

різні види відходів, у тому числі і пластик. До цих законів можуть бути включені положення щодо збору, переробки та утилізації пластикових відходів.

Імплементація законодавства, пов'язаного з пластиком, в Україні, ймовірно, передбачатиме співпрацю із зацікавленими сторонами галузі, неурядовими організаціями та громадськістю. Залучення зацікавлених сторін має вирішальне значення для успішного впровадження регуляторних заходів. Україна може ініціювати просвітницькі та просвітницькі кампанії для інформування громадськості, підприємств і промисловості про вплив пластику на навколишнє середовище та важливість екологічних практик.

Важливо, що житлові рішення не можуть боротися з проблемою мікропластику самі по собі; промислові витoki з переробних підприємств є важливим джерелом забруднення мікропластиком. Наприклад, хоча системи очищення води, які видаляють мікропластик, наразі продаються споживачам для побутового використання (наприклад, «Showerloop», який фільтрує воду для повторного використання та одночасно видаляє мікропластик. Крім того, уряди можуть розглянути оцінку стандартів викидів у стічні води, щоб визначити дозволenu кількість пластикових скидів у стічні води). Наприклад, в Австрії через викиди промислових мікропластиків у стічні води у водне середовище щорічно скидається приблизно 2,7 мільйона PET-пляшок за вагою. Гарсія та ін. зазначають, що уряди можуть надавати субсидії або податкові пільги компаніям, які запроваджують нові технології чи практики для зменшення споживання пластику. Ці фінансові стимули можуть бути використані для сприяння встановленню та запровадженню цих технологій або для розширення цих зусиль у більших системах, які можна прийняти для промислового використання.

Враховуючи постійне утворення мікропластику з макропластику в навколишньому середовищі, технології запобігання та збору мікропластику необхідно поєднувати з технологіями запобігання та збору макропластику в навколишньому середовищі та в системах промислових стічних вод.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Microplastics solutions for a better life. <https://bit.ly/3VtLf9x>
2. Microplastics: a big problem for the environment. <https://bit.ly/3Tea6w4>
3. Microplastics explained. <https://bit.ly/3VtLoK7>
4. [«Life Cycle of a Plastic Product»](#). Americanchemistry.com. Archived from [the original](#) on March 17, 2010. Retrieved July 1, 2011.
5. Гош, Шампа; Сінха, Джитендра Кумар; Гош, Сум'я; Вашістх, Кшитій; Хан, Сонсу; (січень 2023). [«Мікропластик як нова загроза глобальному навколишньому середовищу та здоров'ю людини»](#). Екологічність. 15 (14): 10821
6. Артур, Кортні; Бейкер, Джоел; Бемфорд, Холлі (2009). [«Матеріали Міжнародного дослідницького семінару про виникнення, наслідки та долю морського сміття з мікропластику»](#) (PDF). *Технічний меморандум NOAA*.
7. Коллінґтон, Амандін; Гек, Жан-Анрі; Гальгані, Франсуа; Коллар, Франція; Гоффарт, Енн (2014). [«Річна варіація неютонських мікро- та мезопластичних частинок та зоопланктону в затоці Кальві \(Середземномор'я–Корсика\)»](#) (PDF). *Бюлетень забруднення моря*. 79 (1–2): 293–298
8. Європейське хімічне агентство. [«Обмеження використання навмисно доданих частинок мікропластику до споживчих або професійних продуктів будь-якого виду»](#). ЕЧЧА. Європейська комісія. [Архів](#) оригіналу за 15 січня 2022. Процитовано 8 вересня 2020.
9. Гош, Шампа; Сінха, Джитендра Кумар; Гош, Сум'я; Вашістх, Кшитій; Хан, Сонсу; ↑ Bhaskar, Rakesh (червень 2023). [«Мікропластик як нова загроза глобальному навколишньому середовищу та здоров'ю людини»](#). *Екологічність*. 15 (14): 10821. DOI:[10.3390/SU151410821](#). ISSN [2071-1050](#).

10. Масура, Джулі; Бейкер, Джоел; Фостер, Грегорі; Артур, Кортні Оселедець, Карлі (ред.): Лабораторні методи аналізу мікропластику в морському середовищі: Рекомендації щодо кількісного визначення синтетичних частинок у водах і осадах, (2015).

<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296>

11. Кокнл Джеремі Л.; Баез Дель Валле, Крістіан Д.; Тернер, Джеффрі В. «Чи недооцінюємо ми забруднення мікропластиком у водному середовищі?». Екологічний менеджмент. 61 (1): 1–8, (2017).

12. Microplastics. The EU aims to address the growing volume of microplastics in the environment.

https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/microplastics_en

13. VRU (2021), Pro obmezhenja obigu plastykovykh paketiv na terytorii' Ukrainy, Zakon Ukrainy vid 01.06. No. 1489-IX, [Online], available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1489-20#Tex>

14. Патель, Маюр М.; Гоял, Бхуміка Р.; Бхадада, Шраддха В.; Бхатт, Джей С.; Амін, Авані Ф.: «Потрапити в мозок: підходи до покращення доставки ліків у мозок» (2009).

15. Development Solutions: Big plans to cut microplastics. <https://www.eib.org/en/essays/plastic-pollution>

16. Коул Метью; Ліндек Пенні; Файлман Елейн; Галсбенд Клаудія; Гудхед Піс; Могер Джуліан інші. «Поглинання мікропластику зоопланктоном». Екологічна наука та технології, (18 червня 2013 р.).

17. «Звідки береться морське сміття?». Факти про морське сміття. Британська федерація пластмас.

18. Жульєн; Фрію, Демієн: «Первинний мікропластик в океанах: глобальна оцінка джерел» (2017).

19. Коул, Метью; Ліндек, Пенні; Галсбенд, Клаудія; Галловей, Тамара С. «Мікропластик як забруднювач морського середовища: огляд». Бюлетень забруднення моря. 62 (12): 2588–2597, (2011).

20. Жульєн; Фріо, Демієн: «Первинний мікропластик в океанах: глобальна оцінка джерел» (2017).
21. Коул, Метью; Ліндек, Пенні; Галсбєнд, Клаудія; Галловей, Тамара С. «Мікропластик як забруднювач морського середовища: огляд». Бюлетень забруднення моря. 62 (12): 2588–2597, (2011).
22. Ковочич Майкл; Ліонг Монті; Паркер Джилліан А.; О Су Чеун; Лі Джессіка П.; Сі Луан; Крейдер Маріса Л.; Юніс Кеннет М.: «Хімічне картування частинок зносу шин і доріг для аналізу окремих частинок». Наука про загальне середовище.
23. Конкл Джеремі Л.; Баєз Дель Валле Крістіан Д.; Тернер Джеффрі В.: «Чи недооцінюємо ми забруднення мікропластиком у водному середовищі?» Екологічний менеджмент. 61(1): 1–8, (2017).
24. Plastic free July: How to stop accidentally consuming plastic particles from packaging.
<https://www.stuff.co.nz/environment/114132313/plastic-free-july-how-to-stop-accidentally-consuming-plastic-particles-from-packaging>
25. Масура, Джулі; Бейкер, Джоел; Фостер, Грегорі; Артур, Кортні Оселедець, Карлі (ред.): Лабораторні методи аналізу мікропластику в морському середовищі: Рекомендації щодо кількісного визначення синтетичних частинок у водах і осадах, (2015).
<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296>
26. Копєнгаген: Міністерство навколишнього середовища та продовольства Данії, Датське агентство з охорони навколишнього середовища, стор. 14. «Мікропластик: поява, наслідки та джерела викидів у навколишнє середовище в Данії», 2015.
27. More than ever, our clothes are made of plastic. Just washing them can pollute the oceans. Браян Резнік.
<https://www.vox.com/the-goods/2018/9/19/17800654/clothes-plastic-pollution-polyester-washing-machine>

28. Microplastic waste: This massive (tiny) threat to sea life is now in every ocean.
<https://web.archive.org/web/20200102120101/https://www.independent.co.uk/news/science/microplastic-waste-this-massive-tiny-threat-to-sea-life-is-now-in-every-ocean-9602430.html>
29. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>
30. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/LSU/?uri=CELEX:32019L0904>
31. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R2151>, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2021.077.01.0040.01.FRA&toc=OJ%3AL%3A2021%3A077%3AFULL
32. <https://circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/3edf8072-cb82-4eef-a353-f84ccc9d8985/details?download=true>, <https://circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/5fbaf7c8-41a5-4c2a-bd45-b69c700978b5/details?download=true>, <https://circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/787afdef-4b80-4cec-93dc-e91e6f2bd317/details?download=true>, <https://circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/466e246b-cfa3-4b3e-a3c7-fe78bb53ee0a/details?download=true>
33. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32021D1752>
34. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31994L0062>
35. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1601561123103&uri=CELEX:32015L0720>
36. Томас Ліндквіст і Карл Лідгрєн, «Моделі розширеної відповідальності виробника», Швеція, жовтень 1990 р.

37. Томас Ліндквіст, «Назустріч [EPR] – аналіз досвіду та пропозицій», квітень 1992 р.
38. Закон України «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України»
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1489-20#Text>
39. Корнуолл В. 2021. Пожирачі пластику. Наука 373: 36–39. 10.1126/наук.373.6550.36
40. Маклауд М., Арп Х.Х., Текман М.Б., Янке А. 2021. Глобальна загроза від забруднення пластиком. Наука 373: 61–65. 10.1126/science.abg5433.
41. Амобоньє А., Бхагват П., Равендран С., Сінгх С., Піллаї С. 2021. Вплив мікропластику та нанопластику на навколишнє середовище: сучасний огляд. Передній мікробіол 12:768297. 10.3389/fmicb.2021.768297
42. Коельманс А.А., Редондо-Хасселерхарм П.Е., Нор Н.М., Де Рюйтер В.Н., Мінтеніг С.М., Коой М. 2022. Оцінка ризику частинок мікропластику. Nat Rev Mater 7:138–152. 10.1038/s41578-021-00411-y.
43. Мітрано Д.М., Вік П., Новак Б. 2021. Розміщення нанопластику в контексті глобального забруднення пластиком. Нат Нанотехнол 16: 491–500. 10.1038/s41565-021-00888-2.
44. Леслі Х.А., Ван Вельзен М., Брандсма Ш.Ш., Ветаак А.Д., Гарсія-Вальєхо Дж.Дж., Ламорі М.Х. 2022. Виявлення та кількісна оцінка забруднення пластиковими частинками крові людини. Навколишнє середовище 163:107199. 10.1016/j.envint.2022.107199
45. Голлоцький О., Герке С. 2020. Чи може нанопластик змінити клітинні мембрани? Chemphyschem 21:9–12. 10.1002/cphc.201900481.
46. Конституція України: офіц. текст. Київ: КМ, 2015. 98 с.
47. Закон України «Про відходи»: офіц. текст. Київ: КМ, 2018.
48. Microplastics Analysis
<https://www.bruker.com/content/bruker/int/en/applications/detection-and-environmental/environmental/Microplastics->

[Analysis.html?gclid=CjwKCAiAh9qdBhAOEiwAvxIok2GSC8p0C3fLDFgXVU-T60pDy6xhBpgZZfRbGWpcM_mznNqCc8XIbxoCLpQQA vD_BwE](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2787(1998)17:1<1::aid-mas1>3.0.co;2-k)

49. Маршалл, А. Г.; Хендриксон, К. Л.; Джексон, Г. С. (1998). «Мас-спектрометрія циклотронного резонансу з іонним перетворенням Фур'є: праймер». *Масовий спектр. Преподобний*. **17** (1): 1–35. [Бібкод:1998MSRv...17....1M](#). [doi:10.1002/\(sici\)1098-2787\(1998\)17:1<1::aid-mas1>3.0.co;2-k](#). [ПМІД 9768511](#)

50. Маршалл, А. (2002). «Детектування циклотронного резонансу іонного перетворення Фур'є: принципи та експериментальні конфігурації». *Міжнародний журнал мас-спектрометрії*. **215** (1–3): 59–75

51. Gardiner, DJ. *Практична раманівська спектроскопія* (1989). Springer-Verlag.

52. Хаммес, Гордон Г. (2005). *Спектроскопія для біологічних наук*. Хитрий. [ISBN 9780471733546](#). [OCLC 850776164](#).

53. «Виявлення різноманітних мікропластиків у калі людини: перспективна серія випадків» («Detection of various microplastics in human stool: a prospective case series»), P. Schwabl, S. Köppel, P. Königshofer, T. Bucsics, M. Trauner, T. Reiberger, B. Liebmann, с., **171** (7) (2019), стор. 453 – 457.

54. «Ти те, що ти їси: мікропластик у фекаліях молодих чоловіків, які живуть у Пекіні» («You are what you eat: Microplastics in the feces of young men living in Beijing»), N.a. Zhang, Y.B. Li, H.R. He, J.F. Zhang, G.S. Ma.

55. «Plasticenta: перші докази мікропластику в плаценті людини» («Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta»), A. Ragusa, A. Svelato, C. Santacroce, P. Catalano, V. Notarstefano, O. Carnevali, F. Papa, M.C.A. Rongioletti, F. Baiocco, S. Draghi, E. D'Amore, D. Rinaldo, M. Matta, E. Giorgini.

56. Структура м'якої та твердої білкової корони навколо полістирольних нанопластиків — розмір частинок і типи білків» («Structure of soft and hard protein corona around polystyrene nanoplastics—Particle size and

protein types»), S. Kihara, S. Ghosh, D.R. McDougall, A.E. Whitten, J.P. Mata, I. Köper, D.J. McGillivray.

57. Послуги водопостачання та водовідведення в Дунайському регіоні: Примітки по країні, Світовий банк.

58. Вивіз сміття з Тиси, Г. Сіклоші, OVF Media Material (2017).

59. Десять тисяч тонн відходів і деревного сміття було зібрано з Тиси на греблі Кіскьоре

https://index.hu/belfold/2019/12/11/tizezer_tonna_hulladekot_es_uszadekfat_emeltek_ki_a_tiszabol_a_kiskorei_vizlepcsonek/

60. Майбутні сценарії глобального утворення та утилізації пластикових відходів», («Future scenarios of global plastic waste generation and disposal»), L. Lebreton, A. Andrady, Комун Палгрейв, 5, № 6 (2019).

61. Послуги водопостачання та водовідведення в Дунайському регіоні: Примітки по країні, Світовий банк.

62. «Мікропластикові волокна – недооцінена загроза для водних організмів?» («Microplastic fibers - underestimated threat to aquatic organisms?»), A. Rebelein, I. Int-Veen, U. Kammann, J.P. Scharsack.

63. «Роль природних і соціальних ресурсів у розвитку туризму Закарпатської області, Україна», J. Tatrai.

64. «Просторові моделі мезопластику та грубого мікропластику в заплавах ґрунтах у результаті землекористування та річкових процесів» («Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes»), C.J. Weber, C. Opp.

65. «Річковий мікропластик: поведінка, просторово-часова мінливість і рекомендації щодо стандартизованого відбору проб і моніторингу» («Riverine microplastics: behaviour, spatio-temporal variability, and recommendations for standardised sampling and monitoring»), K. Skalska, A. Ockelford, J.E. Ebdon, A.B. Cundy.

66. Роланд; Джамбек, Дженна Р.; Закон, Кара Лаванда «Виробництво, використання та доля всіх коли-небудь виготовлених пластмас», (липень 2017).
67. Andrady, Anthony L. (лютий 1994). «Оцінка екологічного біологічного розпаду синтетичних полімерів». *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*. 34 (1): 25–76
68. Ахмед, Темур; Шахід, Мухаммад; Азім, Фаррух; Расул, Іджаз; Шах, Асад Алі; Номан, Мухаммед; Хамед, Амір; Манзур, Наташа; Манзур, Ірфан; Muhammad, Sher (березень 2018). «Біодеградація пластмас: поточний сценарій та майбутні перспективи екологічної безпеки». *Наука про навколишнє середовище та дослідження забруднення*. 25 (8): 7287–7298.
69. Jambeck, Jenna, *Science* 13 лютого 2015: том. 347 № 6223; та ін. (2015). «Потік пластикових відходів із землі в океан». *Наука*. 347 (6223): 768–771.
70. Повідомлення Комісії до Європейського парламенту, Ради, Європейського економічного та соціального комітету та Комітету регіонів – Європейська стратегія використання пластмас у циркулярній економіці.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN>
71. Huffman, George L.; Келлер, Деніел Дж. (1973). «Проблема пластику». *Полімери та екологічні проблеми*: 155–167.
72. Національне громадське радіо, 12 вересня 2020 р. «Як велика нафта ввела громадськість в оману, змусивши повірити, що пластик буде перероблений».
73. PBS, Frontline, 31 березня 2020 р., «Інсайтери індустрії пластмас розкривають правду про переробку».
74. Nikiema, Josiane; Asiedu, Zipporah (квітень 2022). «Огляд вартості та ефективності рішень для вирішення питання забруднення пластиком». *Наука про навколишнє середовище та дослідження забруднення*. 29 (17): 24547–24573.

75. Lau, Winnie WY; Шіран, Йонатан; Бейлі, Річард М.; Кук, Ед; Штуктей, Мартін Р.; Коскелла Юлія; Веліс, Костас А.; Годфрі, Лінда; Буше, Жульєн; Мерфі, Маргарет Б.; Томпсон, Річард К.; Янковська, Емілія; Кастільо Кастільо, Артуро; Пілдітч, Тобі Д.; Діксон, Бен; Керсельман, Лаура; Косіор, Едуард; Фавоіно, Енцо; Гутберле, Ютта; Балч, Сара; Атрея, Міра Е.; Фішер, Девід; Він, Кевін К.; Петі, Мілан М.; Сумайла, У. Рашид; Ніл, Емілі; Бернгофен, Марк В.; Лоуренс, Кіт; Паларді, Джеймс Е. (18 вересня 2020 р.). «Оцінка сценаріїв до нульового забруднення пластиком». Наука. 369 (6510): 1455–1461.

76. «Стандартна практика кодування пластикових виробів для ідентифікації смоли». Стандартна практика кодування виробів із пластику для ідентифікації смоли. <http://www.astm.org/Standards/D7611.htm>

77. Hollóczy, Oldamur; Герке, Саша [«Чи може нанопластика змінювати клітинні мембрани?»](#). ChemPhysChem. 21 (1): 9–12, (2020).

78. Гейєр, Роланд (2020). Пластикові відходи та переробка: вплив на навколишнє середовище, суспільні проблеми, запобігання та рішення. Амстердам: Academic Press.

79. «Вчені використовують пластик для виготовлення сталі». [«Вчені використовують пластик для виготовлення сталі»](#).

80. Nomura, Seiji (березень 2015). «Використання пластикових відходів у коксовій печі: огляд».

81. Khan, Kaffayatullah; Джалал, Фазал Е.; Ікбал, Мудассір; Хан, Мухаммад Імран; Амін, Мухаммед Насір; Аль-Файад, Маджді Адель (23 квітня 2022 р.). «Прогнозне моделювання міцності на стиск відходів PET/SCM змішаного цементного розчину з використанням програмування експресії генів».

82. Reis, JML; Carneiro, EP (1 лютого 2012). «Оцінка заповнювачів відходів PET в полімерних розчинах». Будівництво та будівельні матеріали.

83. Awoyera, PO; Adesina, A. (червень 2020). «Пластикові відходи для будівельних виробів: стан, обмеження та перспективи». Приклади з будівельних матеріалів.
84. «Використання пластикових відходів у будівництві доріг». <https://pib.gov.in/PressReleaseDetailm.aspx?PRID=1740262>
85. Конлон, Кеті (18 квітня 2021). «Пластикові дороги: не все, що вони заасфальтовані». Міжнародний журнал сталого розвитку та світової екології.
86. Dębska, Bernardeta; Brigolini Silva, Guilherme Jorge (січень 2021). «Механічні властивості та мікроструктура епоксидних розчинів, виготовлених з відходів поліетилену та поліетилентерефталату».
87. Торнікрофт, Дж.; Опп, Дж.; Савойкар, П.; Ball, RJ (10 лютого 2018). «Ефективність конструкційного бетону з переробленими пластиковими відходами як часткова заміна піску». Будівництво та будівельні матеріали.
88. Бахідж, Сіфатулла; Омарі, Сафіулла; Feugeas, Франсуаза; Факірі, Аманулла (15 липня 2020 р.). «Свіжі та затверділі властивості бетону, що містить різні форми пластикових відходів – Огляд». Управління відходами.
89. De Bruin CR, de Rijke E., van Wezel AP, Astefanei A. Методології для характеристики, ідентифікації та кількісної оцінки нано- та субмікронних розмірів пластмас у відповідних середовищах для впливу на людину: Критичний огляд. Навколишнє середовище. Sci. Adv. 2022; 1: 238-258 [[DOI](#)].
90. Lee H., Kim S., Sin A., Kim G., Khan S., Nadagouda MN, Sahle-Demessie E., Han C. Методи попередньої обробки для моніторингу мікропластику в зразках ґрунту та прісноводних опадів: комплексний огляд. Sci. Total Environ. 2023;871:161718 [[DOI](#)].
91. Монтейру С.С., Пінту да Коста Дж. Методи екстракції мікропластику в складних зразках твердої речовини, води та біоти. Trends Environ. анальний Chem. 2022;33:e00151 [[DOI](#)].

92. Nabi I., Bacha AUR, Zhang L. Огляд методів виділення мікропластику з навколишнього середовища. Ж. Чистий. Виробник 2022;337:130458 [[DOI](#)].
93. Debraj D., Lavanya M. Microplastics Everywhere: A Review on Existing Methods of Extraction. Sci. Total Environ. 2023;893:164878 [[DOI](#)].
94. Razeghi N., Hamidian AH, Mirzajani A., Abbasi S., Wu C., Zhang Y., Yang M. Методи підготовки зразків для аналізу мікропластику в прісноводних екосистемах: огляд. Навколишнє середовище. Chem. Lett. 2021; 20: 417-443 [[DOI](#)].
95. De La Guardia M. Інтегрований підхід аналітичної хімії. Ж. Браз. Chem. Соц. 1999;10:429-437 [[DOI](#)].
96. Валькарсель М. Аналітична хімія. IntechOpen; Лондон, Великобританія: 2012. Аналітична хімія сьогодні і завтра.
97. Hurley RR, Nizzetto L. Доля та поява мікро(нано)пластиків у ґрунтах: прогалини в знаннях та можливі ризики. Curr. Опін. Навколишнє середовище. Sci. Здоров'я. 2018;1:6–11 [[DOI](#)].
98. Андрадій А. Л. Мікропластики в морському середовищі. Мар. Поллют. Бик. 2011;62:1596-1605 [[DOI](#)].
99. .Luo W., Su L., Craig NJ, Du F., Wu C., Shi H. Порівняння забруднення мікропластиком у різних водоймах від міських струмків до прибережних вод. Навколишнє середовище. забруднення. 2019;246:174-182 [[DOI](#)].
100. Ельтнер А., Сардеманн Х., Грундманн Дж. Технічна примітка: Вимірювання швидкості течії та витрати в річках за допомогою наземних зображень і знімків БПЛА. Гідрол. Земна система Sci. 2020; 24: 1429–1445 [[DOI](#)].
101. Ezzat MB, Bahgat M., Roushdy M., Elghorab E. Дослідження ефективності системи циркуляції води для оцінки якості води в штучних

лагунах. Практичний приклад Hacienda Bay. Наука про воду басейну Нілу інж. J. 2013; 6: 22–34.

102. Ahmad M., Tariq JA, Rafique M., Iqbal N., Choudhry MA, Qureshi RM. Вимірювання швидкості потоку підземних вод на ділянці блоку Chashnapp Unit-2 за допомогою радіоіндикаторної техніки (№ PINSTECH--207) Пакистанський інститут ядерної науки та технологій; Ісламабад, Пакистан: 2008.

103. Barackman M., Brusseau ML Екологічний моніторинг та характеристика. Академічна преса; Кембридж, Массачусетс, США: 2002. Відбір проб підземних вод; С. 121–139 [DOI].

104. Mulligan AE, Charette MA, Tamborski JJ, Moosdorf N. Encyclopedia of Ocean Sciences. Elsevier; Амстердам, Нідерланди: 2019. Підводний скид підземних вод; С. 108–119.

105. Чепман Д.В., ред. Оцінка якості води: Керівництво з використання біоти, відкладень і води в екологічному моніторингу. CRC Press; Бока-Ратон, Флорида, США: 1996.

106. Li Q., Wu J., Zhao X., Gu X., Ji R. Відокремлення та ідентифікація мікропластику з ґрунту та осаду стічних вод. Навколишнє середовище. забруднення. 2019;254:113076 [DOI].

107. Томпсон Р.К., Олсон Ю., Мітчелл Р.П., Девіс А., Роуланд С.Дж., Джон А.В.Г., Макгонігл Д., Рассел А.Е. Загублені в морі: де весь пластик? Наука. 2004;304:838 [DOI].

108. Лібезайт Г., Дубайш Ф. Мікропластик на пляжах східно-фризьких островів Шпікерог і Качелотплат. Бик. Навколишнє середовище. Contam. Токсикол. 2012;89:213-217 [DOI].

109. Ендерс К., Ленц Р., Бір С., Стедмон К.А. Вилучення мікропластику з біоти: рекомендоване кислотне травлення руйнує звичайні полімери пластику. ICES J. Mar. Sci. 2017;74:326-331 [DOI].

110. Де Вітте Б., Деврізе Л., Бекерт К., Хоффман С., Вандермерш Г., Курман К., Роббенс Дж. Оцінка якості блакитної мідії (*Mytilus Edulis*): порівняння комерційних і диких видів. Мар. Поллют. Бик. 2014;85:146-155 [[DOI](#)].
111. Вандермерш Г., Ван Каувенберге Л., Янссен К.Р., Маркес А., Гранбі К., Фейт Г., Коттерман М.Дж., Діоген Дж., Бекерт К., Роббенс Дж. та ін. Критичний погляд на кількісне визначення мікропластику у водних організмах. Навколишнє середовище. рез. 2015;143:46-55 [[DOI](#)].
112. Cole M., Webb H., Lindeque PK, Fileman ES, Halsband C., Galloway TS. Виділення мікропластику в багатих біотою зразках морської води та морських організмах. Наукові доповіді. 2014; 4: 4528 [[DOI](#)].
113. Крайтон Е.М., Ноель М., Гіс Е.А., Росс П.С. Новий, незалежний від щільності та сумісний із FTIR підхід для швидкого вилучення мікропластику з водних опадів. анальний методи. 2017; 9: 1419-1428 [[DOI](#)].
114. Фуллер С., Гаутам А. Процедура вимірювання мікропластику за допомогою екстракції рідиною під тиском. Навколишнє середовище. Sci. технол. 2016;50:5774–5780 [[DOI](#)].
115. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson RC, Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. Навколишнє середовище. Sci. технол. 2012;46:3060-3075 [[DOI](#)].
116. Felsing S., Kochleus C., Buchinger S., Brennholt N., Stock F., Reifferscheid G. A New Approach in Separation Microplastics from Environmental Samples Based Their Electrostatic Behavior. Навколишнє середовище. забруднення. 2018; 234: 20-28 [[DOI](#)].
117. Grbic J., Nguyen B., Guo E., You JB, Sinton D., Rochman CM Magnetic Extraction of Microplastics from Environmental Samples. Навколишнє середовище. Sci. технол. Lett. 2019; 6: 68–72 [[DOI](#)].

118. Gao D., Li XY, Liu HT Джерело, поява, міграція та потенційний екологічний ризик мікропластику в осаді стічних вод і під час поповнення ґрунту мулом. *Sci. Total Environ.* 2020;742:140355 [DOI].
119. Вілліс К.А., Еріксен Р., Вілкокс К., Хардесті Б.Д. Розподіл мікропластику на різних глибинах осадів у міському лимані. *Фронт. мар. наук.* 2017; 4: 419 [DOI].
120. Грегорі М.Р. Накопичення та розповсюдження первинних пластикових гранул на пляжах Нової Зеландії. *NZJ березень Freshw. рез.* 1978;12:399-414 [DOI].
121. Оуда М., Банат Ф., Хасан С.В., Караніколас Г.Н. Останні досягнення в стратегіях на основі нанотехнологій для відновлення мікропластику та нанопластику з водних середовищ. *J. Water Process Eng.* 2023;52:103543 [DOI].
122. Rhein F., Scholl F., Nirschl H. Magnetic Seed Filtration for the Separation of fine Polymer Particles from Dilute Suspensions: Microplastics. *Chem Eng Sci.* 2019;207:1278-1287 [DOI].
123. Ендерс К., Тагг А.С., Лабренц М. Оцінка електростатичного відділення мікропластику від зразків навколишнього середовища, багатих мінералами. *Фронт. Навколишнє середовище. Sci.* 2020; 8: 112 [DOI].
124. Масура Дж., Бейкер Дж., Фостер Г., Артур С. Лабораторні методи аналізу мікропластику в морському середовищі: рекомендації щодо кількісного визначення синтетичних частинок у водах і осадах. Відділ морського сміття NOAA; Silver Spring, MD, США: 2015 [DOI].
125. Cerasa M., Teodori S., Pietrelli L. Searching Nanoplastics: From Sampling to Sample Processing. *полімери.* 2021;13:3658 [DOI].
126. Wu X., Zhao X., Chen R., Liu P., Liang W., Wang J., Teng M., Wang X., Gao S. Очисні споруди діють як основні джерела утворення мікропластику у водному середовищі: А Критичний огляд. *Вода Res.* 2022;221:118825 [DOI].

127. Ластовіна Т.А., Будник А.П. Огляд методів екстракції, видалення та стимульованої деградації мікропластику. *J. Water Process Eng.* 2021;43:102209 [DOI].
128. Монтейру С.С., Роша-Сантос Т., Прата Дж.К., Дуарте А.С., Жірао А.В., Лопес П., Крістован Т., да Коста Дж.П. Простий метод вилучення мікропластику із зразків прісної води, багатих органікою. *Sci. Total Environ.* 2022; 815: 152941 [DOI].
129. Барнетт С., Еванс Р., Кінтана Б., Міліу А., П'єтролуонго Г. Екологічно чистий метод ідентифікації мікропластику за допомогою аналізу щільності. Навколишнє середовище. Токсикол. Chem. 2021; 40: 3299-3305 [DOI].
130. Picó Y., Barceló D. Micro(Nano)Plastic Analysis: A Green and Sustainable Perspective. *Дж. Хазард. Матер. Adv.* 2022;6:100058 [DOI].
131. Махон А.М., О'Коннелл Б., Хілі М.Г., О'Коннор І., Офіцер Р., Неш Р., Моррісон Л. Мікропластики в осадах стічних вод: наслідки обробки. Навколишнє середовище. *Sci. технол.* 2017;51:810-818[DOI].
132. Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway TS Мікропластики як забруднюючі речовини в морському середовищі: огляд. *Мар. Поллют. Бик.* 2011;62:2588-2597 [DOI].
133. Leslie HA, Brandsma SH, van Velzen MJM, Vethaak AD Microplastics En Route: польові вимірювання в дельті голландської річки та каналах Амстердама, очисних спорудах, відкладеннях Північного моря та біоті. Навколишнє середовище. *Міжн.* 2017;101:133–142 [DOI].
134. Sun Q., Ren SY, Ni HG Поширеність мікропластику в продуктах особистої гігієни: значна частина забруднення пластиком. *Sci. Total Environ.* 2020;742:140218 [DOI].
135. Napper IE, Bakir A., Rowland SJ, Thompson RC Характеристика, кількість і сорбційні властивості мікропластику, вилученого з косметики. *Мар. Поллют. Бик.* 2015;99:178-185 [DOI].

136. Kalčíková G., Alič B., Skalar T., Bundschuh M., Gotvajn A.Ž. Стічні води очисних споруд як джерело косметичних поліетиленових мікрогранул у прісну воду хемосфера. 2017; 188:25-31 [[DOI](#)].

137. Lei K., Qiao F., Liu Q., Wei Z., Qi H., Cui S., Yue X., Deng Y., An L. Вивільнення мікропластику з продуктів особистої гігієни та косметики в Китаї. Мар. Поллют. Бик. 2017;123:122-126 [[DOI](#)].